Aus der Herzchirurgischen Klinik
der Universität München, Klinikum Großhadern
Direktor: Prof. Dr. med. Dr. h.c. W. Klinner

Nichtinvasive Untersuchung der territorialen linksventrikulären Funktion nach Bypassoperation; First-Pass-Radionuklidangiographie

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig-Maximilians-Universität in München

vorgelegt von
Albrecht Hartmann
aus Passau

1984

Mit Genehmigung der medizinischen Fakultät der Universität München

Berichterstatter:	Prof. Dr. med. B. Reichart
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. med. Dr. h.c. W. Klinner
Korreferent:	Prof. Dr. med. G. Riecker
Dekan:	Prof. Dr. med. W. Spann
Prüfung am:	29.5.84

Aus der Herzchirurgischen Klinik
der Universität München, Klinikum Großhadern
Direktor: Prof.Dr.med. Dr.h.c. W.Klinner

Nichtinvasive Untersuchung der territorialen linksventrikulären Funktion nach Bypassoperation; First- Pass- Radionuklidangiographie

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig-Maximilians-Universität in München

vorgelegt von
Albrecht Hartmann
aus Passau

1984

Mit Genehmigung der medizinischen Fakultät der
Universität München

Berichterstatter:	Prof. Dr. med. B.Reichart
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. med. Dr. h.c. W.Klinner
Korreferent:	Prof. Dr. med. G.Riecker
Dekan:	Prof. Dr. med. W.Spann
Prüfung am:	29.5.84

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Einleitung	1
B. Methodik	
I. Präoperative Koronarangiographie	5
II. Operationstechnik der aorto-koronaren Umleitung	6
III. Postoperative nichtinvasive Radionuklid-untersuchungen	8
1. Charakteristik möglicher Untersuchungs-techniken	8
1.1 Statische Szintigraphie mit ^{201}Thallium	8
1.2 Dynamische Szintigraphie mit ^{99m}Technetium	9
1.2.1 EKG-getriggerte Herzbinnenraumszintigraphie	9
1.2.2 Die Methode der ersten Passage (First-Pass-Technik)	9
2. Durchführung der Untersuchung mit Hilfe der First-Pass-Technik	10
2.1 Gerätespezifische Voraussetzungen	11
2.2 Injektionstechnik und Bildregistrierung	14
2.3 Datenauswertung	15
2.4 Funktionelle Bilder	26
2.5 Spezielle Technik für die Bypass-kontrolle	30
3. Fahrradbelastung	35
IV. Klassifizierung der Gefäßterritorien	36
V. Auswertestatistik	38
C. Ergebnisse	
I. Patientengut	
1. Präoperative Daten	39
2. Klinischer Verlauf	42
II. Postoperative Radionuklidangiographie in Ruhe und unter Belastung	
1. Globale Ejektionsfraktion	42

Seite

2. Territoriale Ejektionsfraktion der Regionen ohne Revaskularisationsmaßnahme

a) Regionen, die von nicht oder wenig erkrankten Koronararterien versorgt werden (Kontrollgruppe 1) 43

b) Regionen, die von einem hochgradig veränderten Koronargefäß versorgt werden, mit oder ohne vorhergehendem Myokardinfarkt ohne wesentliche Versorgung durch Kollateralgefäße (Kontrollgruppe 2) 44

c) Regionen, die von einem hochgradig veränderten Koronargefäß versorgt werden, mit oder ohne vorhergegangenem Myokardinfarkt sowie starker Ausbildung von Kollateralgefäßen 46

3. Territoriale Ejektionsfraktion der komplett revaskularisierten Territorien ohne vorhergegangenen Myokardinfarkt 46

4. Territoriale Ejektionsfraktion der komplett revaskularisierten Territorien mit vorhergegangenem Myokardinfarkt 48

5. Territoriale Ejektionsfraktion inkomplett revaskularisierter Territorien ohne und mit vorausgegangenem Myokardinfarkt 49

6. Vergleich der territorialen und globalen Ejektionsfraktion 51

D. Diskussion

I. Diskussion der Methode 55

1. Vorteil der Isotopenuntersuchung in First-Pass-Technik gegenüber der Katheterangiographie 55

2. Durchführung der Untersuchung unter Belastung 55

3. Territoriale Ejektionsfraktion als Kriterium 57

4. Kritik der First-Pass-Technik 59

5. Vorteil durch die Benutzung funktioneller Bilder 62

II. Diskussion der Ergebnisse

1. Klinische Ergebnisse 64

2. Territoriale Ejektionsfraktion unter Belastung 65

Seite

3. Beziehung zwischen territorialer und globaler Ejektionsfraktion in Ruhe und unter Belastung 69

E. Schlußfolgerung 71

F. Zusammenfassung 72

G. Literaturverzeichnis 74 - 85

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544319_0007

A. Einleitung

Die koronare Herzerkrankung ist in den Ländern der westlichen Welt eine der häufigsten Todesursachen, in der Bundesrepublik sogar die häufigste (4, 12, 80) Betroffen sind dabei nicht nur ältere Menschen, sondern zunehmend auch jüngere; so war der jüngste Infarktpatient im Jahre 1976 22 Jahre alt (75). Die enorme Bedeutung dieser Erkrankung führte bereits in den 30er und 40er Jahren dazu, daß auch von chirurgischer Seite versucht wurde, die Durchblutungsverhältnisse des Herzens zu verbessern. In den Anfängen der sich entwickelnden Koronarchirurgie beabsichtigte man, durch Erzeugen von Verwachsungen zwischen Peri- und Epikard das Einsprossen von Kapillargefäßen anzuregen (5). Den Abschluß dieser Entwicklung bildete die Einpflanzung der A. mammaria interna in das Myokard durch VINEBERG (85).

Die ersten Eingriffe an den Herzkranzgefäßen selbst erfolgten 1947/48 mit der Arterialisierung des Koronarsinus durch BECK (6). Von FAVOROLO wurde die Technik der aortokoronaren Überbrückungsoperation unter Verwendung eines Vena-saphena-magna-Interponats entwickelt (50), die von JOHNSON zur Mehrfachbypassoperation mit dem Ziel der kompletten Revaskularisation erweitert wurde. Die zur Zeit fast ausschließlich verwendete Methode geht auf GARRAT zurück (22), der sie erstmals 1964 erfolgreich durchführte.

Voraussetzung für den Aufschwung der Koronarchirurgie war das Vorhandensein einer einwandfreien Diagnostik, die mit der Einführung der selektiven Koronarangiographie durch SONES, 1958, gegeben war (78).

Inzwischen unterzogen sich in den USA viele Tausende einer Operation. Auch in Europa fand sich eine zunehmende Tendenz (39), wobei allein in der Bundesrepublik im Jahr 1982 6967 Operationen durchgeführt wurden (62). Heute besteht trotz

gestiegener Operationszahlen nach Schätzung der WHO ein Nachholbedarf von 400 Operationen pro 1 Million Einwohner.

Ein wesentliches Problem postoperativ stellt die Beurteilung der Durchgängigkeit der Bypasses dar; nach internationalen Erfahrungen wird mit einer Verschlußquote von 10 - 20 % innerhalb der ersten 3 postoperativen Monate gerechnet (45). Die dazu in erster Linie verwandten Methoden sind die erneute Koronar- und Bypassangiographie und in neuerer Zeit die CT-Angiographie (40, 18, 24, 84, 32), sowie nuklearmedizinische Methoden (19, 46, 56, 73, 77).

Weiterhin von Interesse ist die Funktion des linken Ventrikels nach aortokoronarer Bypassoperation. Eine Möglichkeit war bislang die postoperative, invasive Linksventrikel- Angiographie mit der Berechnung von linksventrikulären Parametern (linksventrikulärer enddiastolischer Druck und Volumen, linksventrikuläres endsystolisches Volumen und globale Ejektionsfraktion). Heute kann man nichtinvasive, nuklearmedizinische Methoden verwenden, die es ebenfalls erlauben die funktionell wichtigen Parameter wie globale Ejektionsfraktion und Ventrikelvolumina zu gewinnen und die darüberhinaus eine Untersuchung unter Belastungsbedingungen ermöglichen.

Die üblicherweise aus dem Linksventrikel-Angiogramm oder mittels nuklearmedizinischer Methoden als Parameter der Funktion errechnete globale Ejektionsfraktion beschreibt den linken Ventrikel als funktionelle Einheit und differenziert nicht zwischen den drei Funktionsgebieten der drei Koronararterien, d.h. des Ramus interventricularis anterior, des Ramus circumflexus und der rechten Koronararterie mit ihren Ästen. Die einzelnen Gefäße können aber in ganz unterschiedlichem Ausmaß von der Koronarerkrankung befallen sein und entsprechend wird sich auch die Funktion in diesen Gebieten verschieden verhalten, vor allem unter Belastung. Zum Beispiel führt eine hochgradige Stenose des Ramus circumflexus oder ein Infarkt in dessen Versorgungsgebiet zu einer umschriebenen

Kontraktionsstörung und damit zu einer umschriebenen Funktionsverschlechterung. Dies kann aber bei Bewertung der globalen Ejektionsfraktion nicht ins Gewicht fallen, wenn z.B. das Ausbreitungsgebiet des Ramus circumflexus klein ist und die beiden anderen Gefäßgebiete mit einer normalen Funktion in die globale Ejektionsfraktion mit eingehen. Damit stellt die globale Ejektionsfraktion einen Bilanzwert der verschiedenen Gefäßgebiete dar, der dem regionalen Charakter der koronaren Herzerkrankung nicht Rechnung trägt.

Vor allem nach Bypassoperationen stellt sich die Frage nach der Funktion in den einzelnen von Operationsmaßnahmen betroffenen Gefäßgebieten des linken Ventrikels in Ruhe und unter Belastung. Um dem besonderen Charakter der koronaren Herzerkrankung Rechnung zu tragen, wird deshalb für die Ejektionsfraktion der Myokardareale, die von einem bestimmten Koronargefäß versorgt werden, der Begriff "territorial" verwandt. Demnach setzt sich die globale Ejektionsfraktion aus drei territorialen Ejektionsfraktionen entsprechend den Ausbreitungsgebieten der drei Hauptkoronararterien und ihrer Äste zusammen und jede der drei territorialen Ejektionsfraktionen ist ein Parameter der Pumpleistung eines von einem bestimmten Gefäß versorgten Myokardareal, durch dessen Kontraktion eine bestimmte Menge Blut bewegt wird.

Die zur Zeit beste nichtinvasive Methode zur Feststellung der territorialen Funktion ist die Nuklidangiokardiographie. Diese erlaubt nicht nur die Darstellung der Wandbewegung und Errechnung der globalen Volumina und Ejektionsfraktionen in Ruhe und unter Belastung zu jedem gewünschten Zeitpunkt, sondern entsprechend einem besonders entwickelten Programm auch die Beurteilung der Funktion in den drei Koronargefäßgebieten sowie die Berechnung von drei getrennten territorialen Ejektionsfraktionen in Ruhe und unter Belastung.

Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe der nichtinvasiven Herzbinnenraumszintigraphie bei Benutzung der First-Pass-Technik die Wirksamkeit der aorto-koronaren Bypassoperation auf die territoriale Funktion anhand der territorialen Ejektionsfraktion in Ruhe und bei Belastung quantitativ zu beurteilen.

B. Methodik

I. Präoperative Koronarangiographie

Die präoperative Angiographie mit selektiver Darstellung der Koronararterien und des linken Ventrikels erfolgte mit der Technik nach JUDKINS (36), die gegenüber der Technik nach SONES (79) den Vorteil der leichteren Handhabung bietet.

Dabei wird mit der von SELDINGER angegebenen Technik (86) die Femoralarterie mit einer Nadel unterhalb des Leistenbandes punktiert. Der Verlauf der Arterie wird dazu zunächst palpatorisch festgelegt und das Gebiet des Stichkanals mit 20 ml eines Lokalanästhetikums (Xylonest (R) 1%ig) anästhesiert. Nach Inzision der Haut mit einem Skalpell wird die Arterie mit den Fingern auf ihrer Unterlage fixiert und mit der Nadel punktiert, deren einwandfreie Lage im Gefäß sich durch kräftiges, pulsierendes Ausspritzen des Blutes zeigt. Nach Vorschieben eines Führungsdrahtes unter Durchleuchtungskontrolle bis unterhalb des Abganges der Nierenarterien wird mittels eines Dilatators der Stichkanal und die Arterieneinstichstelle erweitert. Anschließend wird nach Entfernen des Dilatators der Katheter unter EKG- und Durchleuchtungskontrolle über den Führungsdraht vorgeschoben. Vor Sondierung der Koronarostien wird der Führungsdraht entfernt und der Katheter mit Kontrastmittel gefüllt.

Man beginnt die Untersuchung mit der wichtigen linken Koronararterie, weshalb als erstes ein linkskoronarer Judkins-Katheter (Firma Cordis) Anwendung findet, der durch seine Krümmungen das Sondieren des linken Ostiums ermöglicht. Unter manueller Injektion von 6 - 8 ml Kontrastmittel (76%iges Urographin) werden Röntgenfilme (35 mm) in schrägrechter und schräglinker kraniokaudaler Projektion belichtet. Nach Wechsel des Katheters auf einen rechtskoronaren Katheter über den erneut eingelegten Führungsdraht wird die

rechte Koronararterie in gleicher Weise dargestellt. Anschließend erfolgt nach erneutem Katheterwechsel (Pigtail-Katheter) die linksventrikuläre Druckmessung und Aufnahme des linken Ventrikels ebenfalls in den vorgenannten beiden schrägen Projektionen. Nach Katheterentfernung wird die Arterie in Höhe der Punktionsstelle etwa 20 Minuten komprimiert, bis eine sichere Blutstillung gewährleistet ist. Die Koronararterien werden in üblicher Weise durch Projektion der 35 mm - Filme auf einen Schirm beurteilt, wobei kurzstreckige Stenosen der Seitenäste besondere Beachtung finden.

II. Operationstechnik der aorto-koronaren Umleitung

In Allgemeinnarkose wird der Thorax durch mediane Sternotomie geöffnet. Dies geschieht durch einen Hautschnitt vom Jugulum bis in die Linea alba unterhalb des Xyphoids, scharfer Durchtrennung der Fett- und Bindegewebsschichten und des Ligamentum interclaviculare sowie Durchsägen des Brustbeins mit einer oszillierenden oder gleitenden Säge von kaudal nach kranial. Eine Unterbrechung der Beatmung schützt die Pleuren vor einer Verletzung. Nach Blutstillung wird der Brustkorb gespreizt und der Herzbeutel zwischen rechter und linker Pleura freipräpariert. Anschließend spaltet man das Pericard zur Freilegung des Herzens längs. Das Herz wird zur Untersuchung vorsichtig aus dem Herzbeutel herausluxiert. Die endgültige Entscheidung, welche Koronararterien mit einem Bypass versorgt werden, fällt nunmehr. Gleichzeitig erfolgt die Präparation der Vena saphena magna, die das Gefäßmaterial für die Bypasses aller Patienten liefert.

Im folgenden werden die Vorbereitung für das Einnähen der venösen Implantate getroffen. Hierzu wird die Herz-Lungen-Maschine über die Aorta ascendens und die beiden Hohlvenen angeschlossen. Des weiteren wird über die rechte obere Lungenvene ein Überlaufventil eingebracht, um das Blut aus dem

linken Ventrikel abzusaugen und ihn so zu entlasten. In diesem Stadium übernimmt die Herz-Lungen-Maschine die Herz-Kreislauf-Funktion. Um den Sauerstoffbedarf des Myokards zu vermindern, wird durch Kühlung des Blutes eine mittlere Ganzkörperhypothermie von 28° C erzeugt (8, 58).

Die Präparation der Koronararterien erfolgt nunmehr am flimmernden (elektrisch induziert), aber durchbluteten Herzen, wobei die funktionell und anatomisch beste Stelle zur Bypass-Anastomosierung gesucht wird.

Anschließend wird das Herz stillgelegt. Hierzu wird zum Schutz des Myokards gegen die Auswirkungen der Ischämie - dem Prinzip des abnehmenden Sauerstoffbedarfs bei zunehmender Hypothermie folgend - das Herz auf 10° C abgekühlt. Dies geschieht einmal durch die Technik des "Perikardbrunnens" nach SHUMWAY (58), indem 4° C kalte Kochsalzlösung permanent in den Perikardsack gespült und wieder abgesaugt wird. Zum anderen erfolgt die Injektion einer eiskalten kardioplegischen Lösung (z.Z. Lösung nach Kirklin) in den Aortenbulbus proximal der abgeklemmten Aorta ascendens. Am nunmehr ruhenden, blutleeren Herzen werden die peripheren Anastomosen eingenäht. Dabei werden die Koronararterien in einer Länge von ca. 5 mm eröffnet und die Vene "End-zu-Seit" mit fortlaufender Naht anastomosiert. Nach Möglichkeit wird die Schlangenkraft- oder Sequentialtechnik angewandt, d.h. es werden große Nebenäste, die ebenfalls revaskularisiert werden sollen, über zwischengeschaltete Seit-zu-Seit Anastomosen an die gleiche Vene mit angeschlossen.
Sind alle Anastomosen am Herzen fertiggestellt, kann der aortale Blutstrom freigegeben und das Herz defibrilliert

werden. Während dieser Reperfusions- und Wiedererwärmphase näht man die proximalen Anastomosen bei partiell ausgeklemmter Aorta ascendens ebenfalls End-zu-Seit fortlaufend an.

Zum Ausschluß von intraoperativen Myokardinfarkten bestimmt man CK- und CK MB-Isoenzym am 1. und 2. postoperativen Tag.

Angestrebt wurde soweit wie möglich eine "komplette Revaskularisation", d.h. Fertigung von Bypasses zu allen Haupt- und Nebengefäßen mit hämodynamisch wirksamen Stenosen bis hinunter zu einem Gefäßdurchmesser von 1 mm. So wird z.B. im Gefäßgebiet des Ramus interventrikularis anterior nicht nur dieser selbst als bypassversorgungswürdig - falls stenosiert - eingestuft, sondern auch die Diagonaläste im Falle einer hämodynamisch wirksamen Einengung. Im Gegensatz dazu versteht man unter "inkompletter Revaskularisation" das Vorhandensein eines hochgradig verengten Koronargefäßes mit einem Gefäßdurchmesser von mehr als 1 mm.
Auf einen Bypass wurde aber verzichtet, wenn das zu versorgende Gebiet vernarbt und somit nicht mehr kontraktil war oder eine Anastomosierung aufgrund der Gefäßbeschaffenheit (z.B. diffuse Verkalkung) nicht möglich war.

III. Postoperative nichtinvasive Radionukliduntersuchungen

1. Charakteristik möglicher Untersuchungstechniken

1.1 Statische Szintigraphie mit ^{201}Thallium

Zwei Nuklide werden hauptsächlich in der nuklearmedizinischen Routinediagnostik des Herzens verwendet, die gleichzeitig aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften zwei verschiedene Untersuchungsprinzipien charakterisieren. Die Myokardszintigraphie mit ^{201}Thallium macht sich das den Kaliumionen ähnelnde Verhalten im Zellstoffwechsel zunutze (42, 48, 37, 22).

Wie bei anderen statischen Organszintigraphien, z.B. Leber- und Hirnszintigraphie, geht neben der vitalen Myokardmasse und dem myokardialen Stoffwechsel die Durchblutung des Organs durch die Funktion als ^{201}Thalliumträger in das Anreicherungsverhalten ein (11). Nach HÖR (33) können folgende Aufgaben der ^{201}Thallium-Myokardszintigraphie genannt werden:

- Sichtbarmachung der vital-funktionstüchtigen Myokardzellmasse
- Nachweis akuter regionaler Myokardausfälle (beim Myokardinfarkt)
- zum Nachweis irreversibler ^{201}Tl-Fixationsminderung (beim Myokardinfarkt) und reversibler Myokardischämien (bei hämodynamisch wirksamen Stenosen)
- zur Dokumentation der vital-funktionstüchtigen Myokardzellmasse vor koronar-chirurgischen Eingriffen
- zur Kontrolle nach Bypassoperation (46, 56, 73, 77).

1.2 Dynamische Szintigraphie mit 99 m - Technetium

Man unterscheidet zwei Methoden:

1.2.1 EKG-getriggerte Herzbinnenraumszintigraphie

Nach Markieren von Erythrozyten mit dem Gammastrahler (99m - Tc) und Injektion in eine Vene werden nach Gleichverteilung im Blut Aufnahmen des Herzens mit einer Gammakamera gemacht. Das gleichzeitig mitregistrierte EKG erlaubt die Zuordnung der aufgenommenen Impulse zu bestimmten Phasen der Herzaktion. Um ausreichende Zählraten zu erhalten, ist eine Aufnahmedauer von 5 - 10 Minuten notwendig.

1.2.2 Die Methode der ersten Passage (First-Pass-Technik)

Ein kleines Volumen einer 99 m -Technetium-Pertechnetat-Lösung wird in eine Armvene injiziert. Während des Durchflusses dieser Aktivitätsmenge durch Herz und Lunge werden

von einer Gammakamera Aufnahmen mit einer Bildfrequenz von bis zu 50/s registriert. Aus den von einem Computersystem abgespeicherten Aufnahmen werden bei der Auswertung die Bilder der Aktivitätspassage durch den linken Ventrikel ausgewählt. In der vorliegenden Untersuchung findet die First-Pass-Technik Verwendung, da durch die nur sehr geringe Untergrundstrahlung eine exakte wiederholbare Bestimmung des Herzrandes gewährleistet ist. Von wesentlichem Vorteil gegenüber der Herzbinnenraumszintigraphie ist bei der First-Pass-Technik ferner, daß der linke Ventrikel nicht überlagert vom rechten Ventrikel abgebildet werden kann und sich dadurch in seiner größten Fläche präsentiert.

Als Tracer-Methode kann man mit ihr Durchfluß- und Auswaschzeiten über jedem Herz-Lungenanteil (Herzkammern, Lunge, Gefäße) bestimmen und zudem die Funktion der einzelnen Herzkammern kurven- und bildmäßig darstellen. Für die bildliche Darstellung werden sogenannte "funktionelle Bilder" erarbeitet, die die regionale Funktion für jedes Bildelement auf einem Bild wiedergeben (64). Diese funktionellen Bilder werden auch "parametrische Bilder" genannt.

2. Durchführung der Untersuchung mit Hilfe der First-Pass-Technik

Da sich alle Informationen der unter 1.2.2 an letzter Stelle genannten Bilder von einem kurzen Bolus ableiten und eine hohe zeitliche Auflösung der Bilder (25 - 40 Bilder pro Sekunde) für die Darstellung des Herzens notwendig ist, muß eine hohe Countzahl (registrierte Impulse) bzw. Countdichte (Counts/cm^2) gefordert werden. Diese wird erreicht durch Verwendung einer sehr empfindlichen Gammakamera sowie durch eine spezielle Injektions- und Auswertetechnik.

2.1 Gerätespezifische Voraussetzungen

Für die Passage des Aktivitätsbolus durch die linke Herzkammer steht nur eine sehr kurze Zeitspanne zur Verfügung und zwar maximal 11 Herzzyklen bei herzgesunden Patienten (70).

In dieser kurzen Zeit müssen vom Aufnahmesystem sehr hohe Impulsraten verarbeitet werden, um eine ausreichende Bildstatistik zu erreichen. Die sehr verbreiteten Angerkameras (3) sind wegen ihrer zu geringen Zählraten weniger geeignet, weshalb eine Multikristallkamera nach dem von BENDER und BLAU 1963 beschriebenen Prinzip (7) verwendet wird, hergestellt von der Firma Baird Corporation (USA) und unter dem Namen "Baird Atomic System Seventy Seven" im Handel erhältlich (s. Abb. 1).

Abb. 1: Technische Ausrüstung des nuklearmedizinischen Herzlabors von rechts nach links

1. Multikristallkamera 2. Mikroprozessor
3. Computereinheit mit Auswertekonsole
4. Digitaler Plattenspeicher 5. Banspeichergerät

Die Aufnahme der Strahlung erfolgt bei der Multikristallkamera mit 294 optisch voneinander isolierten NaJ(TI)-Kristallen, die in einer Matrix von 18 x 24 angeordnet und über ein Lichtleitersystem mit 35 Photovervielfacherröhren verbunden sind (Abb. 2). (Im Gegensatz zur Angerkamera, bei der die Aufnahme durch einen einzigen Kristall erfolgt.) Jeder Zeile und Spalte ist ein Photovervielfacher (Photomultiplier) zugeordnet.

Gemäß Abb. 2 wird die einfallende Strahlung für jeden Kristall durch eine Bohrung in einer Bleiplatte kollimiert, d.h. der Abstand zweier Strahlungsquellen, die den Kristall mit ihrer Strahlung erreichen, wird begrenzt.
Je dicker der Kollimator gewählt wird, desto näher liegen diese Punkte zusammen, umso besser ist die Ortsauflösung des Systems. Gleichzeitig sinkt jedoch die Empfindlichkeit.

Es findet ein Parallellochkollimator mit einer Dicke von 2,5 cm Verwendung, wodurch gegenüber einem Kollimator größerer Dicke eine höhere Empfindlichkeit, d.h. bessere zeitliche Auflösung, erreicht wird. Dieser Kollimator paßt die Kamera den schnellen Bewegungsabläufen dynamischer Herzuntersuchungen gut an.

Jedes einfallende Gammaquant erzeugt einen Lichtblitz in einem NaJ(TI)-Kristall, der infolge der Zuordnung der Photovervielfacher zu den Zeilen und Spalten der Kristalle registriert wird. Die örtliche Zuordnung ("Adressierung") zu einem Matrixpunkt erfolgt durch Koinzidenz-Messung. Die Lage ist dann eindeutig festgelegt, wenn gleichzeitig ein Impuls von genau einem Zeilen- und Spaltenphotomultiplier erkannt wird. Durch die Anordnung von 294 Kristallen im Koordinatensystem entfällt die zeitlich aufwendige örtliche Adressierung der Angerkamera. Dadurch wird die Totzeit (Zeit, in der kein Impuls aufgenommen werden kann) des verwendeten Systems wesentlich geringer, d.h. die Zählrate pro Sekunde ist hoch. Entsprechend der frei wählbaren Bildfrequenz von maximal 100 Bildern pro Sekunde bis zu einer Aufnahmezeit

von 1.000 Sekunden pro Bild werden die einfallenden Gammaquanten lokalisiert und in einem elektronischen Speicher registriert. Nach Beendigung der Aufnahme erfolgt die Übertragung des entstandenen digitalen Bildes auf einen Plattenspeicher.

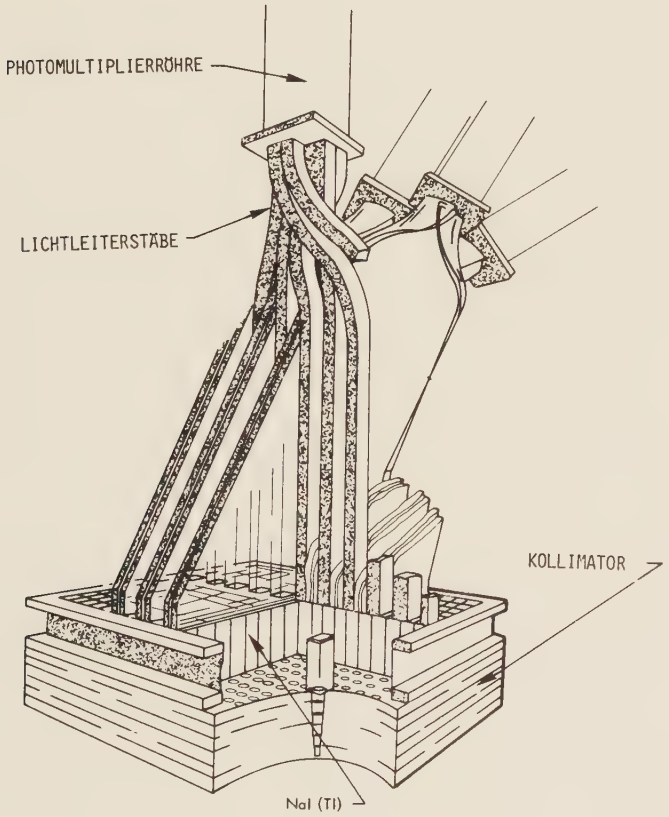

Abb. 2: Schematische Darstellung der Multikristallkamera (24)

Nach der Koinzidenzmessung (örtliche Zuordnung) und Impulshöhenanalyse (Elimination gestreuter Gammaquanten) ist vor allem die Bildübertragung für Totzeiten der Kamera maßgebend. Insgesamt können diese Totzeiten sehr kurz gehalten werden, so daß Zählraten bis zu 500.000 Impulsen pro Sekunde möglich sind.

Um regional möglichst hohe Countdichten zu erhalten, wird die zeitliche Auflösung auf 25 - 40 Bilder pro Sekunde begrenzt (40 - 25 ms Aufnahmedauer pro Bild).

2.2 Injektionstechnik und Bildregistrierung

Ein kompakter Bolus wird unter Anwendung der von REINDL und SCHAD 1974 (59) beschriebenen, weiterentwickelten und bewährten Technik injiziert. Dazu wird eine Venenverweilkanüle aus Teflon (Firma Braun) mit einem Durchmesser von 1,4 mm in eine große antikubitale Vene gelegt. In einem mit der Kanüle verbundenen Teflonschlauch wird mittels eines Dreiwegehahns zunächst die in 0,5 ml Kochsalzlösung eluierte Aktivität (15 - 20 mCi $99^{m}Tc$) gespritzt.

Durch den mit diesem System verbundenen automatischen Injektor (Contrac 3 E Siemens) erfolgt durch Nachschub von 20 ml Kochsalzlösung mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 10 ml/sec die rasche Injektion. Dadurch wird verhindert, daß die Aktivität in das Venensystem diffundiert, da der Bolus kompakt durch den Nachschub von Kochsalz bis hinter die letzte Venenklappe (unter dem Schlüsselbein) und vor den rechten Vorhof geschoben wird. Die EKG-Triggerung dieser Injektion soll erreichen, daß der Bolus in den rechten Vorhof während der Ventrikelsystole einströmt, wodurch er im Vorhof gesammelt wird. Ein Eintritt in der Ventrikeldiastole würde zu einer Teilung des Bolus führen.

Während der ersten Passage des Tracers durch Herz und Lunge werden 1.000 Bilder registriert. Dabei wird die Bildfrequenz

der Herzfrequenz angepaßt. Bei einer Herzfrequenz kleiner als 100/min werden 25 Bilder/sec, bei einer Herzfrequenz größer als 100/min werden 40 Bilder/sec gewählt. Simultan zur Aufnahme wird das EKG des Patienten registriert, wobei auf dem EKG-Streifen neben einer Ableitung mit ausgeprägter positiver R-Zacke und möglichst deutlich sichtbarer T-Welle Markierungen für jedes von der Kamera registrierte Bild sowie für Zeitpunkt und Dauer der Injektion angebracht werden. Eine Zuordnung bestimmter Phasen der Herzkontraktion zu bestimmten Bildern ist somit möglich.

Nach Beendigung der Aufnahme werden die auf Magnetplatte gespeicherten Bilder auf Magnetband zur Langzeitspeicherung überspielt.

2.3 Datenauswertung

Die registrierten Bilder zeigen trotz Verwendung der zeitlich hoch auflösenden Kamera und spezieller Injektionstechnik keine scharfe Begrenzung des Herzrandes, da die erreichbaren Zählraten bei einer Aufnahmezeit von 25 - 40 ms relativ gering sind und somit der Kontrast der Strahlung über dem Ventrikel zur Untergrundstrahlung jedes einzelnen Bildes nicht ausreichend ist. Eine exakte Randdefinition der linken Herzkammer ist jedoch zur Bestimmung regionaler Wandbewegungen Voraussetzung und muß durch Verbesserung der Bildqualität geschaffen werden, und zwar durch

a) Bildung eines sog. "repräsentativen Schlages" (34, 55, 64, 65)

b) Kontrastanhebung des Ventrikels gegenüber der Umgebung (67, 68, 69, 51)

c) Abzug einer individuellen Untergrundstrahlung (67, 68, 69, 51)

ad a) Bildung des sogenannten "repräsentativen Schlages"

Zunächst werden die Bilder von 6 - 9 geeigneten Herzschlägen ausgewählt. Dies geschieht mit Hilfe des EKG und visueller Kontrolle. Auswahlkriterium ist das Verhältnis von Strahlung aus der Herzkammer zur Untergrundstrahlung, d.h. ein möglichst großer Kontrast sowie die gleiche Phase im EKG. Durch ein Computerprogramm werden die korrespondierenden Bilder addiert.

Um eine Überlagerung mit Restaktivität aus anderen Herzkammern möglichst zu vermeiden, werden nur Bilder aus der Auswaschphase des linken Ventrikels verwendet.

Zudem kann angenommen werden, daß die Durchmischung der Aktivität im Ventrikel zu diesem Zeitpunkt optimal ist. Die so durch Addition der Bilder von 6 - 9 Herzzyklen entstandenen Bilder bieten eine höhere Zählratendichte (Counts/cm^2) und somit eine bessere Bildqualität (s. Abb. 3a).

ad b) Kontrastanhebung des linken Ventrikels und Herzrandbestimmung

Die Herzrandbestimmung ist für die Ermittlung der regionalen Wandbewegung von entscheidender Bedeutung. Eine sichere Bestimmung der Grenzpunkte des Herzrandes ist umso leichter möglich, je höher die Zählraten über dem Ventrikel und je niedriger die Zählraten außerhalb des Ventrikels sind. Es wird deshalb eine weitere Kontrastanhebung des Ventrikels gegenüber der Umgebung angestrebt.

Zu diesem Zweck wird ein räumliches Gradientenbild erzeugt, d.h. aus dem R-Phasen-Bild des repräsentativen Schlages wird ein Bild der Betragsquadrate des räumlichen Intensitätsgradienten berechnet (vgl. Abb. 3b).

Das räumliche Gradientenbild (Abb. 3b) ergibt am Rand des Herzens eine Dichtezunahme, während die Untergrundstrah-

lung auf Grund der kleineren räumlichen Gradienten abgesenkt wird. Eine Zunahme des Kontrastes zwischen Herz- und Untergrundstrahlung ist die Folge.

Ein weiteres Bild, das Bild der kontrahierenden Teile des Ventrikels, wird durch Subtraktion des systolischen Bildes vom enddiastolischen Bild erzeugt (Schlagvolumenbild Abb. 4b).

Abb. 3a

Abb. 3b

Abb. 3a: Enddiastolisches Bild des repräsentativen Schlages - entstanden durch Addition der enddiastolischen Bilder aus 6 - 9 Herzzyklen

Abb. 3b: Gradientenbild - dient der Anhebung des Kontrastes im Bereich des Herzrandes gegenüber der Untergrundstrahlung

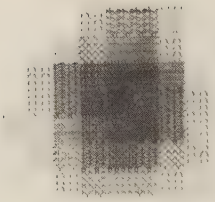

Abb. 4a

Abb. 4b

Abb. 4a: Bild des linken Ventrikels nach Abzug eines konstanten Strahlungsanteils von 40 % vom Bild des repräsentativen Schlages

Abb. 4b: Schlagvolumenbild; gewonnen durch Subtraktion des systolischen Bildes vom enddiastolischen Bild

Schließlich wird ein drittes Bild des linken Ventrikels durch Subtraktion einer bestimmten konstanten Strahlungsintensität vom Bild des repräsentativen Schlages hergestellt. Das entstandene Bild zeigt Abb. 4a.

Die vorgenannten drei Bilder werden mit Gewichtungsfaktoren multipliziert und addiert und ergeben ein kontrastverstärktes Bild (vgl. Abb. 5).

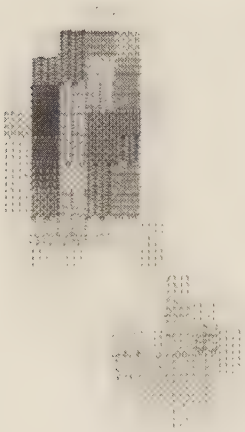

Abb. 5: Kontrastverstärktes Bild des linken Ventrikels; es wird erzeugt durch Addition des Schlagvolumenbildes (Abb. 4b) und räumlichem Gradientenbild (Abb. 3b) zum Untergrund korrigierten Bild (Abb. 4a)

Das kontrastverstärkte Bild des linken Ventrikels erlaubt eine exakte Randbestimmung mit Hilfe eines Intensitätshistogramms, d.h. man berechnet die Häufigkeitsverteilung der Strahlungsdichte und stellt sie in Form einer Kurve dar. Der Punkt der Kurve, der einen plötzlichen Anstieg der Strahlungsdichte erkennen läßt, definiert den Herzrand

(vgl. Abb. 6). Das Verfahren ist als sog. Schwellwertverfahren in der Technik bekannt (14, 54).

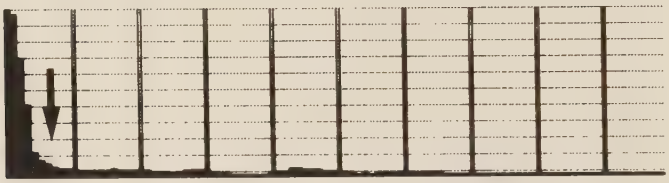

Abb. 6: Intensitätshistogramm des kontrastverstärkten Bildes; der Pfeil markiert den Herzrand, d.h. den Punkt, an dem die Strahlungsdichte plötzlich zunimmt

ad c) Abzug einer individuell angepaßten Untergrundstrahlung

Eine möglichst genaue Schätzung der Untergrundstrahlung im Bereich des linken Ventrikels und deren Abzug vom Bild des linken Ventrikels ist notwendig, um eine exakte Bestimmung der regionalen Ventrikelfunktion zu ermöglichen. Wie Vergleichsuntersuchungen mit den angiographisch ermittelten Wandbewegungen zeigen, genügt es nicht wie üblich eine konstante Untergrundstrahlung abzuziehen, da die Wandbewegungen an verschiedenen Stellen dann verzerrt wiedergegeben werden. Der Grund dafür ist, daß die Untergrundstrahlung nicht gleichmäßig über die Herzkammer verteilt ist, sondern aus einem mehr homogenen Anteil (Strahlung aus den arteriellen Gefäßen im Brustraum) und einem inhomogenen Anteil zusammengesetzt ist. Dieser inhomogene Anteil stammt bei der First-Pass-Technik hauptsächlich aus der Strahlung des sich in der Lunge befindlichen Bolusendes.

Da der Grad der Überlappung des Herzens mit Lungengewebe unterschiedlich ist, ergibt sich auch eine örtlich unterschiedliche Strahlungsintensität; vor allem der Lingulabereich der Lunge bedingt eine vermehrte Strahlung aus dem Bereich des oberen Herzrandes (68).

Zur Ermittlung der unterschiedlichen Untergrundstrahlung wird zu einem Zeitpunkt, in dem sich die meiste Radioaktivität in der Lunge befindet, der Bolus das rechte Herz verlassen und den linken Ventrikel noch nicht erreicht hat, eine Bildfolge ausgewählt und damit ein Bild der Lungenstrahlung erzeugt. Wie bei der Ermittlung der mittleren konstanten Untergrundstrahlung werden Meßpunkte um den Rand des linken Ventrikels angebracht (Abb. 7).

Da die Untergrundstrahlung in der Zeit, die für die Bildung des repräsentativen Schlages benutzt wird, ständig durch die zunehmende Auswaschung der Aktivität aus der Lunge abgenommen hat, stellt die Untergrundstrahlung zu dem oben erwähnten Zeitpunkt zu hohe Werte dar (vgl. Abb.8a und 8b) und muß deshalb angepaßt werden.

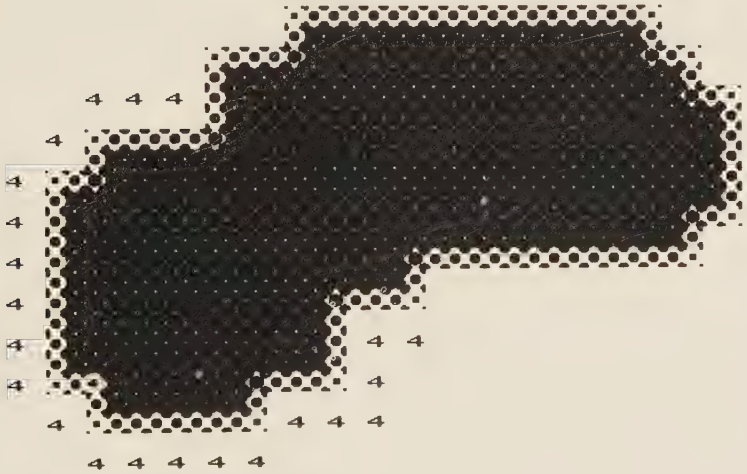

Abb. 7: Lage der Meßpunkte (symbolisiert durch die Ziffer 4) um den Rand des linken Ventrikels

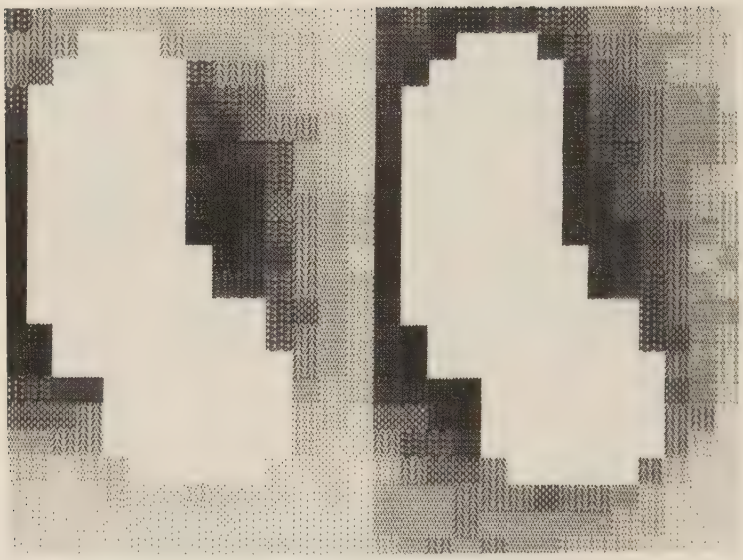

Abb. 8a Abb. 8b

Abb. 8a: Untergrundstrahlung zum Zeitpunkt der Bildung des repräsentativen Schlages; der linke Ventrikel und die Aorta sind ausgespart

Abb. 8b: Untergrundstrahlung zum Zeitpunkt der Boluspassage durch die Lunge; der linke Ventrikel und die Aorta sind ausgeschnitten; deutlich erkennbar ist der höhere Anteil der Untergrundstrahlung um den Herzrand

Dies geschieht durch Vergleich der Randpunkte des linken Ventrikels im Bild der Lungenmatrix (Bildfolge mit maximaler Lungenaktivität Abb. 9a) mit den Randpunkten des linken Ventrikels im Bild des repräsentativen Schlages (Abb. 9b).

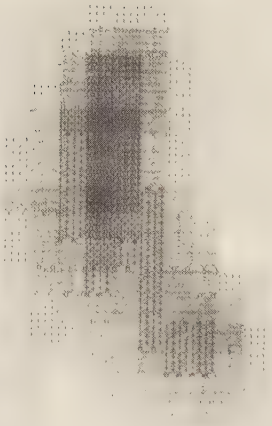

Abb. 9a

Abb. 9b

Abb. 9a: Lage der Meßpunkte zur Registrierung der Untergrundstrahlung zum Zeitpunkt der Boluspassage durch die Lunge

Abb. 9b: Lage der Meßpunkte zur Registrierung der Untergrundstrahlung zum Zeitpunkt der Bildung des repräsentativen Schlages

Der Vergleich der Zählraten der korrespondierenden Randpunkte ergibt Werte, die eine lineare Abhängigkeit von hoher Reproduzierbarkeit aufweisen. Damit kann die ursprüngliche Lungenstrahlung entsprechend abgesenkt werden und es entsteht eine variierende Untergrundstrahlung um und über dem Ventrikel, die zur Herzspitze und von der Vorderwand zur Hinterwand hin abnimmt.

Diese variierende Untergrundstrahlung wird zusammen mit einer konstanten Untergrundstrahlung - bildmäßig dargestellt in Abb. 10a - von allen Bildern des repräsentativen Schlages subtrahiert, wodurch man ein untergrundkorrigiertes Bild

des linken Ventrikels erhält (Abb. 10b).

Eine zusätzlich durchgeführte Glättungsoperation sorgt für glatte Herzränder (Abb. 11) und die erneute Anwendung des Schwellwertverfahrens (vgl. S. 18 f) ergibt scharfe, gut abgrenzbare reproduzierbare Randkonturen des linken Ventrikels (Abb. 12).

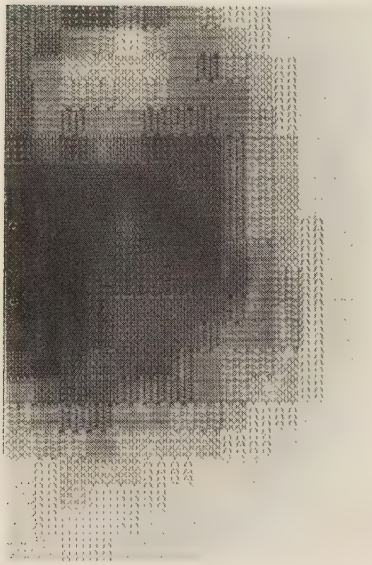

Abb. 10a

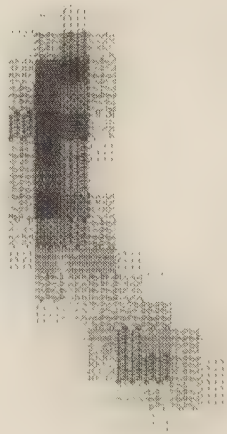

Abb. 10b

Abb. 10a: Bild der Untergrundstrahlung, das von allen Bildern des repräsentativen Schlages subtrahiert wird

Abb. 10b: Bild des repräsentativen Schlages nach Abzug der Untergrundstrahlung

Abb. 11: Bild des linken Ventrikels nach Glättungsoperation

Abb. 12: Bild des linken Ventrikels nach Anwendung des Schwellwertverfahrens

2.4 Funktionelle Bilder

Die funktionellen Bilder, die zur Auswertung der Informationen dienen, die aus der Boluspassage des Radionuklids durch den linken Ventrikel gewonnen werden, sind keine Bilder im herkömmlichen Sinn. Vielmehr stellen diese eine mit Grauwerten oder Farben codierte Zahlenverteilung oder Änderung der Zahlenverteilung in einer bestimmten Zeit und deren mathematische Weiterverarbeitung dar.

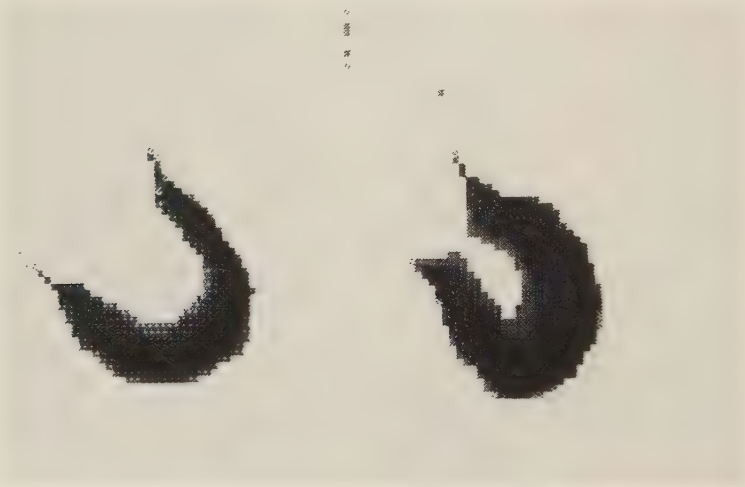

Abb. 13a Abb. 13b

Abb. 13a: Wandbewegungsbild des linken Ventrikels in Ruhe; das Bild entsteht durch Subtraktion der endsystolischen Fläche des linken Ventrikels von der enddiastolischen Fläche; das Ergebnis ist ein hufeisenförmiger Ring, der der Bewegung der Ventrikelwand während der Systole entspricht.

Abb. 13b: Wandbewegungsbild des linken Ventrikels eines herzgesunden Patienten unter Belastung mit gleichmäßiger Zunahme der Wandbewegung in allen Abschnitten

Das einfachste Bild, das Wandbewegungsbild (64), gewinnt man durch Subtraktion der endsystolischen Fläche des linken Ventrikels von der enddiastolischen Fläche (Abb. 13a und b).

Eine bessere Aussage bieten funktionelle Bilder, die alle regionalen Änderungen einer gesamten Herzphase oder eines Teils davon aufzeigen. In der Diagnostik stehen eine Gruppe von Bildern mit diesen Eigenschaften zur Verfügung, dazu gehören das Ejektionsfraktionsbild, das Ejection Rate Image und das Bild der mittleren Transitzeit (53, 51, 67). Das erste Bild aus dieser Gruppe, das Ejektionsfraktionsbild, wurde als einziges in dieser Arbeit verwendet. Es stellt ebenfalls ein Subtraktionsbild dar, da es aus der Differenz zwischen Enddiastole und Endsystole dividiert durch Enddiastole entsteht (64). Eine Verbesserung dieses Bildes wird erreicht durch Anpassung der über dem Zeitraum von Enddiastole bis Endsystole registrierten Zählraten an eine lineare Funktion.

Entsprechend der Zählratenregistrierung durch die 294 NaJ-(TI) Kristalle der Multikristallkamera ergeben sich eigene regionale Ejektionsfraktionen für die einzelnen Matrixelemente. Die ausgeworfenen prozentualen Anteile am Gesamtvolumen werden in Form von hufeisenförmigen Bändern gleicher Werte (gleicher Farbe oder Graustufe) veranschaulicht, die von den Pixeln mit 100%iger Ejektionsfraktion im Bereich der Wandbewegung, in denen das gesamte Blut während der Systole verschwindet, bis hin zu den Pixeln mit sehr niedriger Ejektionsfraktion in der Zone unterhalb der Klappen abnehmen, in der am Ende der Systole das Restblut verbleibt (Abb. 14a und b). Die hufeisenförmigen Bänder sind im Normalfall symmetrisch zur Längsachse des linken Ventrikels angeordnet. Unter Belastung rücken die Zonen hoher Ejektion zur Ventrikelmitte hin vor.

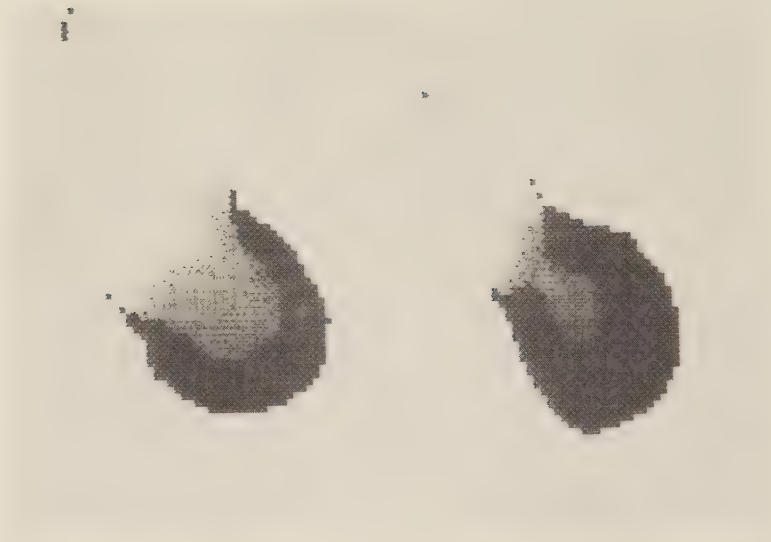

Abb. 14a

Abb. 14b

Abb. 14a: Ejektionsfraktionsbild in Ruhe; hufeisenförmige Bänder zeigen die Zonen gleicher Ejektionsfraktion; die maximalen Werte (100 %) finden sich im Bereich der Wandbewegung

Abb. 14b: Ejektionsfraktionsbild unter maximaler Belastung; unter Belastung rücken die Zonen hoher Ejektion symmetrisch zum Zentrum vor

Im Falle einer Ejektionsverminderung entsprechend einer herabgesetzten Wandbewegung sind die Bänder höherer Ejektionsfraktionen unterbrochen oder fehlen sogar. In diesen Zonen besteht keine Symmetrie entlang der Längsachse des linken Ventrikels. Gebiete mit niederen Werten der Ejektionsfraktion rücken zur Peripherie (Abb. 15a und b).

Zonen mit sehr niederen Ejektionsfraktionen oder fehlender Ejektionsfraktion deuten auf eine Ausdehnung der Wandbewegungsstörung in die Tiefe. Auf diese Weise geben die regio-

nalen Werte praktisch eine dreidimensionale Information und die Ejektionsfraktionen in Prozent lassen sich aus diesen Bildern für beliebige Volumenanteile des linken Ventrikels leicht errechnen.

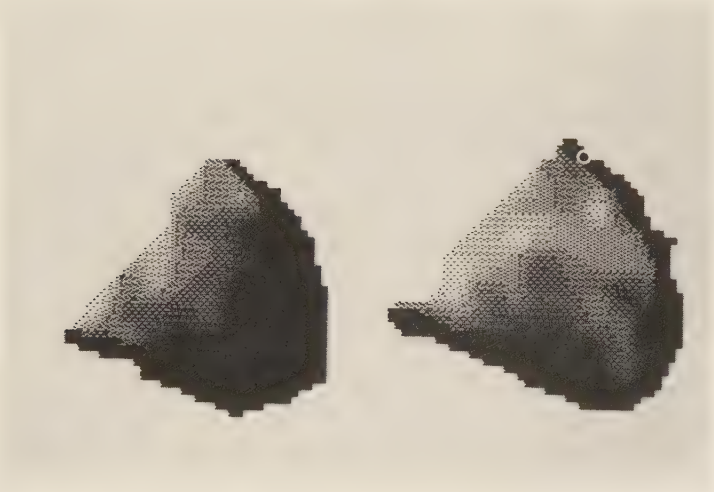

Abb. 15a Abb. 15b

Abb. 15a: Ejektionsfraktionsbild eines Patienten mit zweifachem Bypass zum R.interventricularis anterior und zur rechten Koronararterie (angiographisch Verschluß gesichert); der Ventrikel erscheint vergrößert, die Ejektionswerte im Bereich der Vorderwand sind jedoch noch hoch, die Symmetrie des Bildes ist noch weitgehend gewahrt

Abb. 15b: Ejektionsfraktionsbild des gleichen Patienten unter Belastung; Vorrücken niederer Ejektionsfraktionswerte zur Peripherie im Bereich der Vorderwand und Herzspitze; Absinken der Ejektionsfraktion in diesem Bereich; Verlust der Symmetrie

2.5 Spezielle Technik für die Bypasskontrolle

Die globale Ejektionsfraktion errechnet sich aus den Schlagvolumenimpulsen (enddiastolische Impulse (ED) - endsystolische Impulse (ES)) des gesamten linken Ventrikels, dividiert durch die enddiastolischen Impulse:

$$\frac{ED - ES}{ED} \times 100 = EF \text{ in } \%$$

Die globale Ejektionsfraktion stellt jedoch einen Bilanzwert der drei koronaren Gefäßterritorien dar, der das Resultat nach Bypassoperation in einem bestimmten Gefäßgebiet verschleiern kann. Deshalb ist eine getrennte Berechnung der Ejektionsfraktionen in den Versorgungsgebieten des Ramus interventricularis anterior, des Ramus circumflexus und der rechten Koronararterie von Bedeutung.

Um die drei territorialen Ejektionsfraktionen berechnen zu können, werden zunächst anhand des präoperativen Koronarogramms die drei Gefäßterritorien bestimmt (siehe Abb. 16). Benutzt wird dazu die schrägrechte Projektion.

Mit Hilfe eines Mikroprozessor-Computersystems wird das in rechtsschräger Projektion aufgenommene Radionuklidventrikulogramm entsprechend der drei Regionen aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgt auf dem enddiastolischen Bild und dem Schlagvolumenbild. Dazu werden die Gefäßterritorien zunächst auf das enddiastolische Bild (Abb. 17) übertragen und dann auf das Schlagvolumenbild (Abb. 18) überspielt. Anhand dessen werden zunächst die prozentualen Anteile am enddiastolischen Volumen des linken Ventrikels getrennt berechnet. Sie ergeben sich aus dem Verhältnis der im jeweiligen Gefäßterritorium gemessenen Impulsen zu den gesamten über dem linken Ventrikel gemessenen Impulsen.

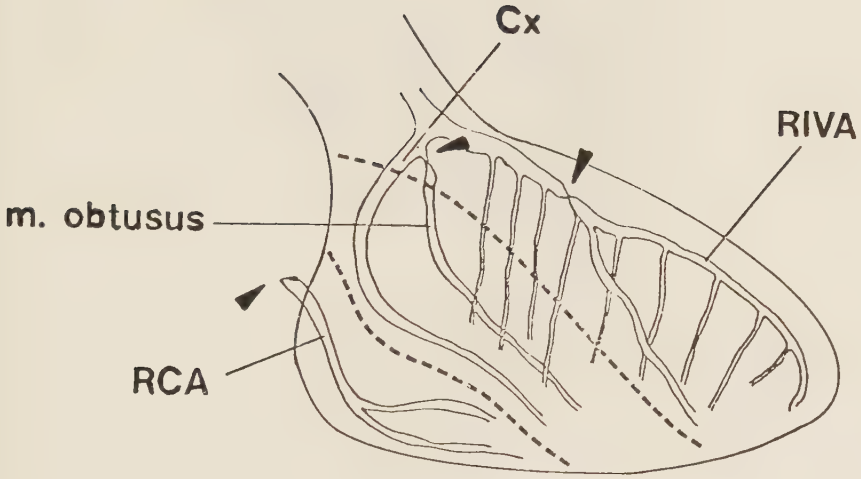

Abb. 16: Schematische Darstellung der Grenzen der drei Gefäßterritorien anhand des präoperativen Koronarangiogramms; Pfeile markieren signifikante Stenosen

RIVA = Ramus interventricularis anterior
CX = Ramus circumflexus
RCA = rechte Koronararterie
m.obtusus = Ramus marginalis obtusus

Abb. 17: Enddiastolisches Bild des linken Ventrikels mit Übertragung des aus dem präoperativen Koronarogramm bekannten Gefäßterritoriums am Beispiel des Ramus interventricularis anterior; das Gebiet ist mit Ziffern (4) gekennzeichnet

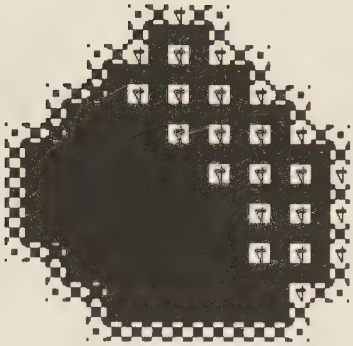

Abb. 18: Schlagvolumenbild; das auf dem enddiastolischen Bild markierte Gefäßterritorium wird vom Computersystem auf das Schlagvolumenbild überspielt; der prozentuale Anteil des Gefäßterritoriums am Gesamtvolumen wird errechnet; der prozentuale Volumenanteil in Ruhe und unter Belastung werden annähernd gleich gehalten

Während die enddiastolischen Volumina in Ruhe und unter Belastung gewöhnlich verschieden sind, wird angenommen, daß der prozentuale Anteil am gesamten enddiastolischen Volumen für jedes Gefäßgebiet unter Belastung annähernd gleich bleibt. Deshalb ist es notwendig, die Gefäßterritorien in Ruhe und unter Belastung so anzupassen, daß die prozentualen Anteile am enddiastolischen Volumen nicht mehr als 2% voneinander abweichen. Dies geschieht unter Verwendung des Schlagvolumenbildes (Abb. 18).

Anschließend werden die systolischen Impulszahländerungen und territorialen Auswurffraktionen (Ejektionsfraktionen) sowohl für die Ruhestudie als auch für die Belastungsuntersuchung am Ejektionsfraktionsbild dargestellt (Abb. 19) und entsprechend der getroffenen Unterteilung des linken Ventrikels errechnet.

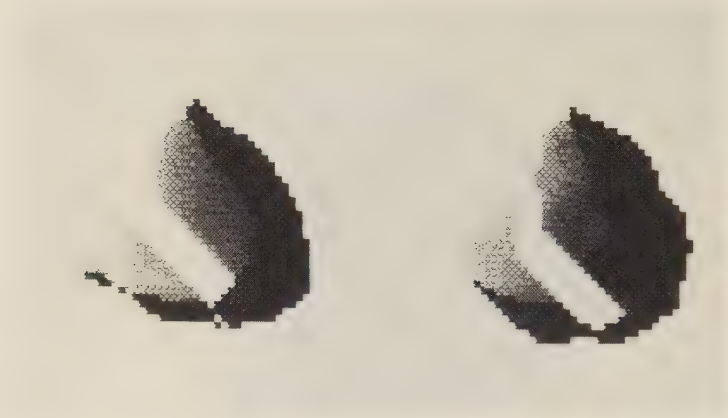

Abb. 19a Abb. 19b

Abb. 19a: Ejektionsfraktionsbild der drei Gefäßterritorien in Ruhe; Circumflexagebiet ausgespart

Abb. 19b: Ejektionsfraktionsbild unter Belastung nach prozentualer Anpassung der Volumenanteile unter Verwendung des Schlagvolumenbildes (vgl. Abb. 18); das Circumflexagebiet ist aus Gründen der Übersichtlichkeit wieder ausgespart

Damit ergeben sich für jeden Patienten neben einer globalen Ejektionsfraktion in Ruhe und unter Belastung auch je drei territoriale Ejektionsfraktionen sowohl für die Ruhe als auch für die Belastung entsprechend den drei Gefäßterritorien.

3. Fahrradbelastung

Nitropräparate wurden für den Tag der Untersuchung, jedoch mindestens 12 Stunden vor Untersuchungsbeginn dem Patient nicht mehr verabreicht, um eine Beeinflussung möglichst auszuschließen. Zur Untersuchung saß der Patient auf einem Fahrradergometer, der Oberkörper in RAO-Position zur Gammakamera (30 Grad schrägrechts) - s. Abb. 20 -.

Abb. 20: Positionierung des Patienten vor der Gammakamera zur Belastungsuntersuchung

Nach Aufnahme der Ruhestudie wurde unter Anwesenheit eines Arztes eine stufenweise Belastung durchgeführt. Dabei wurde in der Regel, ausgehend von einem Basiswert von 25 oder

50 Watt eine Steigerung in 25 Watt - Schritten vorgenommen, wobei jede Belastungsstufe für zwei Minuten beibehalten wurde. Den Abschluß der Belastung bildete unter fortlaufender EKG- und Patientenkontrolle ein "Endspurt". Der Patient wurde in der zuletzt erreichten oder vorletzten Belastungsstufe zu höchstmöglicher Geschwindigkeit aufgefordert. Auf diese Weise wurde erreicht, daß der durch die stufenweise Belastung erreichte Frequenzanstieg während der Aufzeichnung der Belastungsstudie beibehalten wurde.

Die Belastung wurde beendet, sobald die altersbezogene Ausbelastungsfrequenz (200 minus Lebensalter) erreicht war oder belastungslimitierende Faktoren wie anginöse Beschwerden, starke ST-Senkung im EKG, starker Blutdruckanstieg, gehäufte Extrasystolen auftraten.

IV. Klassifizierung der Gefäßterritorien

Die Myokardregionen werden in fünf Gruppen unterteilt:

Gruppe 1:
Regionen ohne Revaskularisationsmaßnahme

a) Regionen, die von nicht oder wenig erkrankten Koronararterien versorgt werden (Kontrollgruppe 1);
b) Regionen, die von einem hochgradig veränderten Koronargefäß versorgt werden, mit oder ohne vorhergehendem Myokardinfarkt ohne wesentliche Versorgung durch Kollateralgefäße (Kontrollgruppe 2);
c) Regionen, die von einem hochgradig verändertem Koronargefäß versorgt werden, mit oder ohne vorhergehendem Myokardinfarkt sowie starker Ausbildung von Kollateralgefäßen;

Gruppe 2:
komplett revaskularisierte Territorien ohne vorhergehendem Myokardinfarkt;

Gruppe 3:
komplett revaskularisierte Territorien mit vorhergehendem Myokardinfarkt;

Gruppe 4:
inkomplett revaskularisierte Territorien ohne Myokardinfarkt und

Gruppe 5:
inkomplett revaskularisierte Territorien mit vorausgegangenem Myokardinfarkt.

Zur Klassifizierung der Gefäßterritorien werden neben dem Koronarogramm der Operationsbericht, Unterlagen des Krankenblattes (EKG, Blutchemie) sowie die Anamnese benutzt.

Die Beurteilung der Gefäßbeschaffenheit geschah am präoperativen Koronarogramm.

Das Ausmaß der Revaskularisation wurde anhand des Operationsberichtes und des präoperativen Koronarogramms bestimmt. Durch eine Gegenüberstellung der im Angiogramm nachgewiesenen hämodynamisch wirksamen Stenosen mit den laut Operationsbericht bypassversorgten Gefäßen erfolgt eine Unterteilung in "komplett oder inkomplett revaskularisierte" Gefäßterritorien. Die "komplette Revaskularisation" ist eine chirurgische Bezeichnung, die die Anzahl der Anastomosen das Ausmaß der Koronargefäßerkrankungen gegenüberstellt.

Bypassverschlüsse gingen als Fehler in die Streuwerte der Mittelwerte ein.

Die Diagnose "alter Myokardinfarkt" war von der typischen Anamnese, dem EKG-Bild, den Laborwerten, dem Koronarangiogramm und dem Verhalten des entsprechenden Myokards im Ventrikulogramm abhängig.

V. Auswertestatistik

Die Daten der einzelnen Gruppen werden mit Hilfe des gepaarten und ungepaarten Student's-t-Test verglichen (15). Verwendet wird der Rechner "HP 41 C".

Die Regressionsgeraden werden mit Hilfe des Hewlett-Packard Rechners HP 67 erstellt.

C. Ergebnisse

I. Patientengut

1. Präoperative Daten

Die Indikation für eine Revaskularisation war bei allen 50 Patienten eine schwere therapie-resistente Angina pectoris. Das Durchschnittsalter z.Zt. der Operation von 47 Männern und 3 Frauen betrug 53 Jahre (± 6,8). Der jüngste Patient war zum Zeitpunkt der Operation 37, der älteste 73 Jahre alt.

Anhand des Krankenblattes und anamnestisch lassen sich für die Patienten Risikofaktoren in nachfolgend aufgeführter Häufigkeit feststellen:
Präoperativ erhöhte Blutzuckerwerte liegen bei 7 von 50 (14 %), erhöhte Blutdruckwerte bei 15 von 50 (30 %), erhöhte Blutfette bei 28 von 50 (56 %) und erhöhte Harnsäurewerte bei 13 von 50 (26 %) vor.

Eine familiäre Belastung mit einem Myokardinfarkt in der engeren Verwandtschaft bei Eltern oder Geschwistern wird von 16 Patienten angegeben (32 %). Unter Übergewicht mit mehr als 5 kg über dem Normalgewicht litten 41 der 50 Patienten. 82 % sind Raucher, 31 Patienten rauchten dabei nach eigenen Angaben mehr als 20 Zigaretten pro Tag.

Die präoperative, aufgrund der Angiographie errechnete globale Ejektionsfraktion ist 33 mal normal (größer 55 %), 9 mal grenzwertig erniedrigt (45 - 55 %) und 1 mal mit 36 % deutlich erniedrigt. Bei 7 Patienten fehlt die präoperative globale Ejektionsfraktion.

Koronararterienengen werden als signifikant erachtet, wenn sie mindestens 70 % der gesamten Fläche des Gefäßes im Angiogramm betragen. Das präoperative Koronarangiogramm deckt

bei der Hälfte der Patienten (25 von 50) eine schwere Dreigefäßerkrankung auf. 17 mal läßt sich eine Zweigefäßerkrankung nachweisen. 8 mal findet sich eine Eingefäßerkrankung, wobei sich jedoch in 5 Fällen zusätzlich 50 - 70 %ige Stenosen in einer weiteren Gefäßregion nachweisen lassen, so daß von einer reinen Eingefäßerkrankung nur in 3 Fällen gesprochen werden kann.

Anhand der Anamnese, der Krankenunterlagen und des Angiogramms kann bei 35 Patienten ein präoperativer Myokardinfarkt diagnostiziert werden, wobei 46 Gefäßterritorien betroffen sind. Im einzelnen finden sich 28 Hinterwandinfarkte und 12 Vorderwandinfarkte. Bei 5 Patienten liegt sowohl ein Hinterwand- als auch ein Vorderwandinfarkt vor. Bei den Hinterwandinfarkten sind 25 mal das Gefäßgebiet der rechten Koronararterie und 9 mal das Gefäßgebiet des Ramus circumflexus betroffen, so daß insgesamt 34 Territorien durch einen Infarkt in ihrer Funktion beeinträchtigt sind.

Weiterhin läßt ich 25 mal ein Prolaps der Mitralklappe nachweisen, wobei 12 mal kein Infarkt im Bereich der rechten Koronararterie nachgewiesen werden kann.

Bei den 50 Patienten wurden 161 Gefäße revaskularisiert. Durchschnittlich wurden 3,2 Bypasses verlegt; die maximale Anzahl betrug 6. 91 Anschlüsse (56%) erfolgten im Gebiet des Ramus interventricularis anterior, das Gebiet des Ramus circumflexus und der rechten Koronararterie waren mit jeweils 35 (22 %) beteiligt.

Unter Berücksichtigung der getroffenen Klassifizierung der Myokardregionen zeigt die nachstehend aufgeführte Tabelle 1 die auf die einzelnen Gruppen entfallende Anzahl an Gefäßterritorien.

Gruppe	Klassifikation	n
Gruppe 1	Regionen ohne Revaskularisationsmaßnahme	
	a) Regionen, die von nicht oder nur wenig erkrankten Koronararterien versorgt werden (Kontrollgruppe 1)	18
	b) Regionen, die von einem hochgradig veränderten Koronargefäß versorgt werden, mit oder ohne vorhergehendem Myokardinfarkt ohne wesentliche Kollateralgefäße (Kontrollgruppe 2)	14
	c) Regionen wie b), jedoch mit Nachweis kräftiger Kollateralgefäße	9
Gruppe 2	komplett revaskularisierte Territorien ohne vorausgegangenen Myokardinfarkt	56
Gruppe 3	komplett revaskularisierte Territorien mit vorausgegangenem Myokardinfarkt	24
Gruppe 4	inkomplett revaskularisierte Territorien ohne Myokardinfarkt	20
Gruppe 5	inkomplett revaskularisierte Territorien mit Myokardinfarkt	8
	Summe	149

Tab. 1: Anzahl der Gefäßterritorien in den einzelnen Gruppen entsprechend der vorgenommenen Klassifizierung; da bei einem der 50 Patienten die rechte Koronararterie nicht an der Versorgung des linken Ventrikels beteiligt ist, ergeben sich nur 149 Gefäßterritorien.

2. Klinischer Verlauf

Die postoperativ bestimmten Laborwerte (Kreatininkinase und CK MB) weisen 2 mal auf perioperative Infarkte hin (CK MB Menge mehr als 10% des Gesamt-CK-Wertes).

Die szintigraphischen Untersuchungen, bei denen durchschnittlich eine Belastungsstufe von 100 Watt erreicht wird, erfolgten im Mittel 8,6 Monate nach der Operation. Zu diesem Zeitpunkt sind 31 der 50 Patienten von Seiten des Herzen beschwerdefrei, 18 Patienten geben eine Besserung der vor der Operation bestandenen Angina pectoris an und nur einmal sind die anginösen Beschwerden unverändert. 15 Patienten klagen über Beschwerden im Thoraxbereich, die keinen anginösen Charakter aufweisen und bei denen das Belastungs-EKG keine Ischämiereaktion erkennen läßt. Nach Angabe von 43 Patienten hat sich die Leistungsfähigkeit gebessert; 23 Operierte sind wieder voll beschäftigt und 5 beabsichtigten, die Arbeit wieder aufzunehmen. Demgegenüber sind 22 in Rente. 26 Patienten nehmen regelmäßig Nitropräparate ein, 23 bzw. 29 erhalten Digitalis- oder ß-Blocker-Präparate.

II. Postoperative Radionuklidangiographie in Ruhe und unter Belastung

1. Globale Ejektionsfraktion

Die postoperative globale Ejektionsfraktion verbessert sich während der maximalen Belastung in 32 Fällen um durchschnittlich 10,1 % - Punkte von 52,3 $\pm$ 8 auf 62,4 $\pm$ 9 %, sie bleibt 7 mal unverändert ($\pm$ 2 %- Punkte) und verschlechtert sich schließlich 11 mal um 7,7 % - Punkte von 58,8 $\pm$ 9 auf 51,1 $\pm$ 8 % (alle Veränderungen p kleiner 0,05).

2. Territoriale Ejektionsfraktion der Regionen ohne Revaskularisationsmaßnahme

a) Regionen, die von nicht oder wenig erkrankten Koronararterien versorgt werden (Kontrollgruppe 1)

Diese Gruppe, die aus 18 Gefäßterritorien besteht und im Angiogramm keine oder nur geringe Veränderungen (Stenosen $< 30\,\%$) der zugehörigen Gefäße zeigt, dient als Kontrollgruppe zur Einschätzung der Auswirkungen der Bypassoperation.

Die territoriale Ejektionsfraktion steigt unter Belastung im Mittel um 11,6 % - Punkte von $43{,}2 \pm 13$ auf $54{,}8 \pm 12{,}6\,\%$ (p kleiner 0,05) an. Dabei ist einmal eine Abnahme und in 14 Fällen ein Anstieg der territorialen Ejektionsfraktion zu verzeichnen. 3 mal bleibt sie unverändert (Änderung kleiner $\pm$ 2 %). In Abb. 21 sind alle Werte der territorialen Ejektionsfraktion in Ruhe und unter Belastung eingetragen. Aus diesen Werten läßt sich eine Regressionsgerade ($y = 22{,}5 + 0{,}6x$) errechnen, die oberhalb der 45°-Identitätslinie liegt. Der Korrelationskoeffizient ist mit $r = 0{,}7$ hoch, die Werte weisen somit eine geringe Streuung auf. Die Regressionsgerade schneidet die 45°-Identitätslinie bei 70 % Ejektionsfraktion.

10 der 18 Territorien fallen in das Versorgungsgebiet der rechten Koronararterie; dabei läßt sich angiographisch und szintigraphisch 8 mal ein Prolaps der Mitralklappe mit unterschiedlich stark ausgeprägter Wandbewegungsstörung der angrenzenden Myokardareale feststellen.

Die Auswirkungen des Mitralklappenprolaps auf die territoriale Ejektionsfraktion unter Belastung können aus nachfolgender Aufstellung entnommen werden:

Anstieg der Ejektionsfraktion	4
Unveränderte Ejektionsfraktion	3
Abfall der Ejektionsfraktion	1

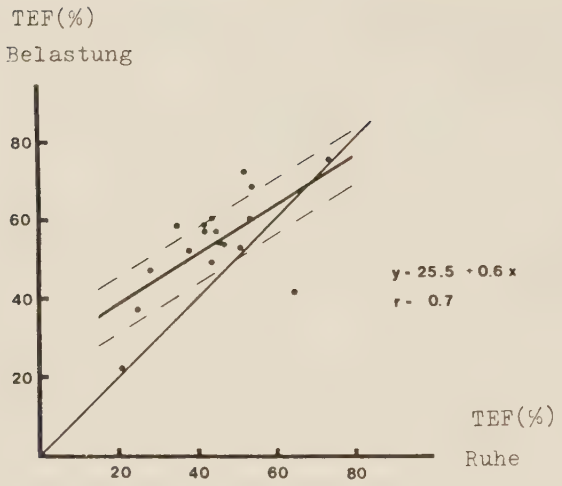

Abb. 21: Territoriale Ejektionsfraktion (TEF) in Ruhe und bei maximaler Belastung der Regionen (n = 18) ohne Revaskularisationsmaßnahme mit angiographisch weitgehend normal erscheinenden Koronararterien; die Regressionsgerade verläuft oberhalb der 45°-Identitätslinie

b) Regionen, die von einem hochgradig veränderten Koronargefäß versorgt werden, mit oder ohne vorhergehendem Myokardinfarkt ohne wesentliche Versorgung durch Kollateralgefäße (Kontrollgruppe 2)

Da ein guter Kollateralkreislauf auf die durch eine Stenose verursachte Minderdurchblutung eines Myokardareals ausgleichen kann, werden Gebiete mit stenotischen Gefäßen ausgeschlossen, die im Angiogramm deutliche Kollateralgefäße erkennen lassen. Die so erhaltene Gruppe umfaßt 14 Regionen, in denen aus operationstechnischen Gründen (zu kleiner Gefäßdurchmesser, diffus verändertes Gefäß, Stenose zu weit in der Peripherie, ausgedehnte Myokardnarbe bei Zustand nach Infarkt) keine Bypassoperation durchgeführt werden konnte. Während der Belastung fällt hier 13 mal die territoriale

Ejektionsfraktion ab und bleibt nur 1 mal unverändert. Ein Anstieg ist nicht zu verzeichnen. Im Schnitt verschlechtert sich die territoriale Ejektionsfraktion um 9% - Punkte (von 47,2 ± 13 auf 38,2 ± 13; p kleiner 0,05). Die aus diesen Werten errechnete Regressionsgerade (y = 3,7 + 0,9) zeigt einen hohen Korrelationskoeffizienten (r = 0,9) und stellt damit eine sehr homogene Gruppe mit geringer Streuung der Werte dar (s. Abb. 22).

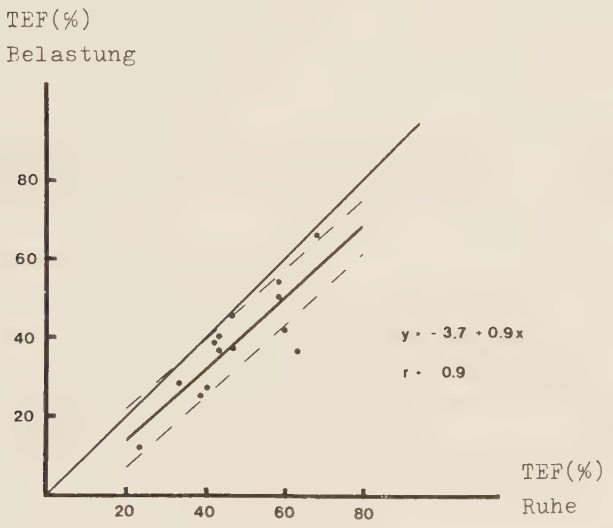

Abb. 22: Territoriale Ejektionsfraktion (TEF) der Kontrollgruppe 2 (n = 14); Gebiete ohne Bypassversorgung mit hochgradig verengten oder verschlossenen Koronararterien ohne Nachweis von Kollateralgefäßen; die Regressionsgerade verläuft unterhalb der 45°-Identitätslinie und schneidet diese nicht

c) Regionen, die von einem hochgradig veränderten Koronargefäß versorgt werden, mit oder ohne vorhergehendem Myokardinfarkt sowie starker Ausbildung von Kollateralgefäßen

Die neun Regionen dieser Gruppe zeigen ein sehr unterschiedliches Verhalten der territorialen Ejektionsfraktion auf die Belastung. 5 mal steigen sie an, 3 mal fallen sie ab, und 1 mal bleibt die Ejektionsfraktion unverändert. Es ergibt sich daraus ein durchschnittlicher Anstieg von 3,4 %-Punkten (von 43,3 $\pm$ 16,3 auf 51,7 $\pm$ 16,8 %). Aufgrund der großen Streuung der Werte läßt sich im Student's-t-Test keine Signifikanz errechnen.

3. Territoriale Ejektionsfraktion der komplett revaskularisierten Territorien ohne vorhergehenden Myokardinfarkt

Die territoriale Ejektionsfraktion dieser Gruppe (n = 56) steigt von 51,6 $\pm$ 13,7 in Ruhe um 11 Punkte auf 62,6 $\pm$ 12,1 % unter maximaler Belastung an (p kleiner 0,001). In einem Territorium kommt es zu einem Abfall und 50 mal zu einem Anstieg der Ejektionsfraktion, die in weiteren fünf Fällen unverändert bleibt.

Die Abbildung 23 zeigt die Regressionsgerade der im Koordinatensystem eingetragenen territorialen Ejektionsfraktion in Ruhe und unter Belastung.

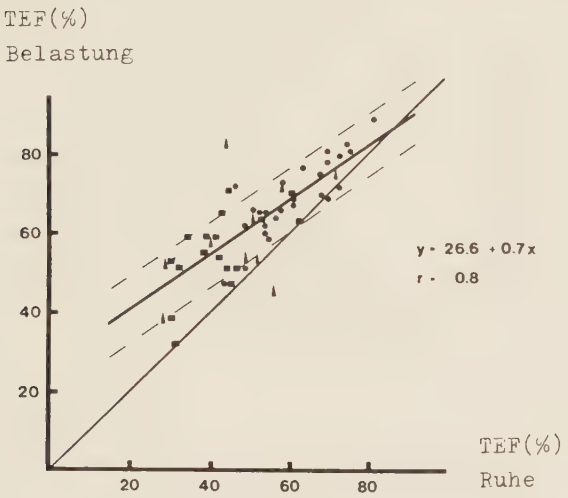

Abb. 23: Territoriale Ejektionsfraktion (TEF) der komplett revaskularisierten Regionen ohne Infarkt in Ruhe und unter Belastung; die Regressionsgerade verläuft oberhalb der 45°-Identitätslinie und schneidet diese zwischen 80 und 85 %; für die drei Gefäßterritorien werden verschiedene Symbole benutzt, so symbolisiert ein ausgefüllter Kreis die Territorien des Ramus interventricularis anterior, ein ausgefülltes Dreieck die Territorien des Ramus circumflexus und ein ausgefülltes Viereck die Territorien der rechten Koronararterie

4. Territoriale Ejektionsfraktion komplett revaskularisierter Territorien mit vorhergehendem Myokardinfarkt

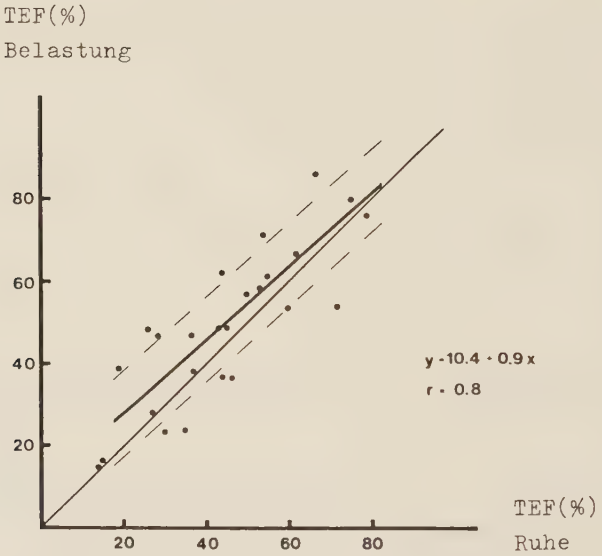

Abb. 24: Territoriale Ejektionsfraktion (TEF) der komplett revaskularisierten Regionen mit vorhergehendem Myokardinfarkt; Lage der Regressionsgeraden knapp oberhalb der 45°-Identitätslinie

Auch in dieser Gruppe erfolgte eine komplette Revaskularisation. Allerdings kann im Gegensatz zur vorher beschriebenen Gruppe ein präoperativer Herzinfarkt nachgewiesen werden. Unter Belastung zeigen 14 der 24 Gefäßgebiete einen Anstieg der territorialen Ejektionsfraktion, sie bleibt 4 mal unverändert und fällt 6 mal ab. Im Mittel steigt die territoriale Ejektionsfraktion um 4,1 %-Punkte (von 44,6 $\pm$ 18,6 auf 48,7 $\pm$ 18,6 %). Für die aus diesen Werten errechnete Regressionsgerade ergibt sich eine Lage oberhalb der 45°-Identitätslinie, wie die Abb. 24 veranschaulicht.

5. Territoriale Ejektionsfraktion inkomplett revaskularisierter Territorien ohne Myokardinfarkt (Gruppe 4) und mit vorausgegangenem Myokardinfarkt (Gruppe 5)

Die territoriale Ejektionsfraktion der Gruppe 4 (n = 20) sinkt unter Belastung um durchschnittlich 4,9 % - Punkte (von 57,8 ± 10,2 auf 52,9 ± 9,7; p kleiner 0,01). Die auch hier gebildete Regressionsgerade zeigt nachstehende Abb. 25. In dieser Gruppe, in der wenigstens ein Koronargefäß, meist Seitenäste der Hauptarterien nicht bypassversorgt wurden, steigt die territoriale Ejektionsfraktion unter Belastung nur in zwei Fällen an, 8 mal bleibt sie unverändert und 10 mal fällt sie ab.

In der letzten Gruppe, der Gruppe 5 (n = 8), die Territorien mit inkompletter Revaskularisation und vorhergehendem Myokardinfarkt umfaßt, findet sich in keinem Fall ein Anstieg

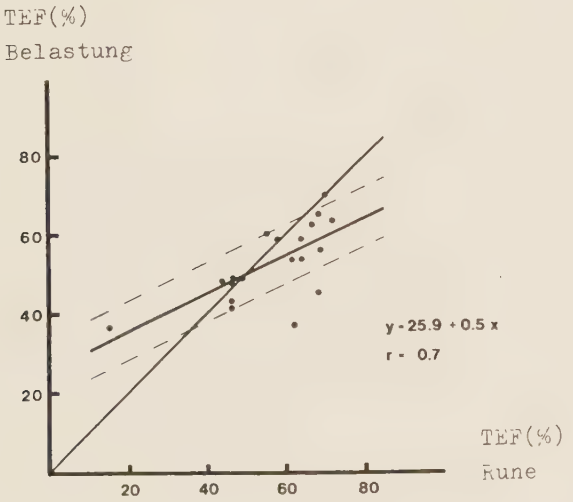

Abb. 25: Regressionsgerade der territorialen Ejektionsfraktion (TEF) errechnet aus den Werten der Gruppe 4, die inkomplett revaskularisierte Territorien ohne Infarkt umfaßt

der territorialen Ejektionsfraktion. Insgesamt verschlechtert sich diese um durchschnittlich 8,1 %-Punkte (von 52,0 ± 13 auf 43,9 ± 13 %; p kleiner 0,05). Die Regressionsgerade verläuft unterhalb der 45° - Identitätslinie (Abb. 26).

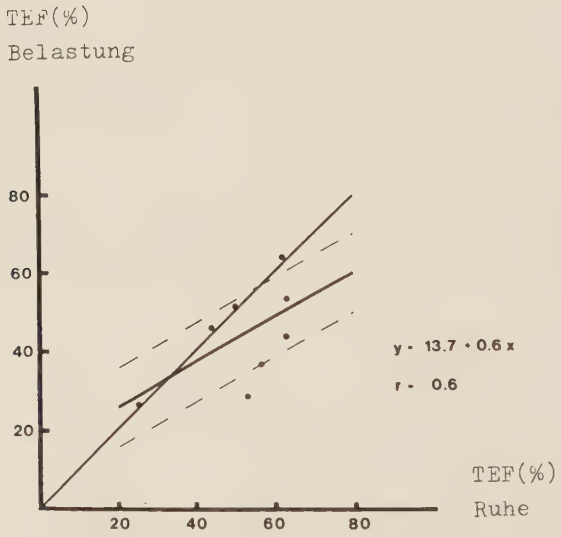

Abb. 26: Regressionsgerade der territorialen Ejektionsfraktion (TEF) errechnet aus den Werten der Gruppe 5 die inkomplett revaskularisierte Territorien mit vorausgegangenen Infarkt umfaßt; die Regressionsgerade verläuft unterhalb der 45°-Identitätslinie

6. Vergleich der territorialen und globalen Ejektionsfraktion

An der globalen Ejektionsfraktion sind die territorialen Ejektionsfraktionen der Gefäßgebiete des Ramus interventricularis anterior, des Ramus circumflexus und der rechte Koronararterie entsprechend ihrem unterschiedlichen Volumenanteil am Gesamtvolumen des linken Ventrikels beteiligt. Das Gebiet des Ramus interventricularis anterior hat mit 58,7% im Schnitt den größten Anteil am Volumen des linken Ventrikels, gefolgt vom Territorium des Ramus circumflexus mit 31 $\pm$ 9% und dem Areal der rechten Koronararterie mit 11,6 $\pm$ 6%.

Die Wichtigkeit des funktionellen Zustandes der größten Region, des Gebietes des Ramus interventricularis anterior, veranschaulicht Tab. 2. In dieser Tabelle wird die Änderung der globalen Ejektionsfraktion unter Belastung in Abhängigkeit vom funktionellen Zustand des Gebietes des Ramus interventricularis anterior entsprechend der im Kapitel Methodik unter Punkt IV erfolgten Klassifikation betrachtet.
Bei kompletter Revaskularisation ohne vorausgegangenem Myokardinfarkt verbessert sich die globale Ejektionsfraktion während der maximalen Belastung in 24 von 27 Fällen (89%). Vorausgegangene Infarkte im Territorium des Ramus interventricularis anterior verringern trotz durchgeführter kompletter revaskularisation die Anstiegsrate der globalen Ejektionsfraktion auf 63% (5 von 8). Bei inkompletter Revaskularisation im Gebiet des Ramus interventricularis anterior ohne oder mit durchgemachten Infarkt verbessert sich die globale Ejektionsfraktion nur um 20% (2 von 10) bzw. überhaupt nicht.

	GEF angestiegen	GEF unverändert	GEF abgefallen
RIVA normal perfundiert (n = 1)	1	-	-
RIVA komplett revaskularisiert; ohne M.I. (n = 27)	24	1	2
RIVA komplett revaskularisiert; mit M.I. (n = 8)	5	2	-
RIVA inkomplett revaskularisiert; ohne M.I. (n = 10)	2	3	5
RIVA inkomplett revaskularisiert; mit M.I. (n = 4)	-	2	2

Tab.: Beziehung zwischen globaler Ejektionsfraktion (GEF) und Beschaffenheit des Gebietes des Ramus interventricularis anterior entsprechend der Klassifikation von Seite 36;

Abkürzungen:
M.I. = Myokardinfarkt; RIVA = Ramus interventricularis anterior; GEF = globale Ejektionsfraktion

Abb. 27 versucht den Zusammenhang zwischen globaler und territorialer Ejektionsfraktion darzustellen. Dabei wird neben der unterschiedlichen Größe der einzelnen Gebiete auch deren Beschaffenheit entsprechend der getroffenen Klassifikation Rechnung getragen. So erhalten normal perfundierte Territorien 6 Punkte, komplett oder inkomplett revaskularisierte Territorien mit oder ohne Myokardinfarkt 5, 4, 3 oder 2 Punkte. Nicht revaskularisierte Territorien mit Infarkt oder hochgradiger Stenose bekommen 1 Punkt. Jede Punktzahl multipliziert sich schließlich mit dem Prozentanteil des entsprechenden Territoriums am Gesamtvolumen des linken Ventrikels. Der danach erhaltene Wert für den gesamten Ventrikel wird der Änderung der globalen Ejektionsfraktion unter Belastung gegenübergestellt. Die Differenz der globalen Ejektionsfraktion zwischen Ruhe und maximaler Belastung korreliert direkt proportional zum Anstieg der Punktesumme (siehe Berechnungsbeispiel). Aus den Einzelbeziehungen kann eine Kurve entsprechend einer Logarithmus naturalis - Funktion errechnet werden ($y = -27{,}0 + 23{,}8 \times \ln x$; $r = 0{,}7$).

Berechnungsbeispiel zur Punktesumme des linken Ventrikels:

Ein Patient mit kompletter Revaskularisation des Territoriums des Ramus interventricularis anterior und der rechten Koronararterie ohne vorausgegangenem Infarkt (jeweils 5 Punkte) und einem hochgradig stenosierten Ramus circumflexus ohne Bypassversorgung erhält bei Volumenanteilen von 50, 6 und 44 % der entsprechenden Gebiete einen Gesamtpunktewert von 3,24.

$$(5 \times 0{,}5) + (5 \times 0{,}06) + (1 \times 0{,}44) = 3{,}24$$

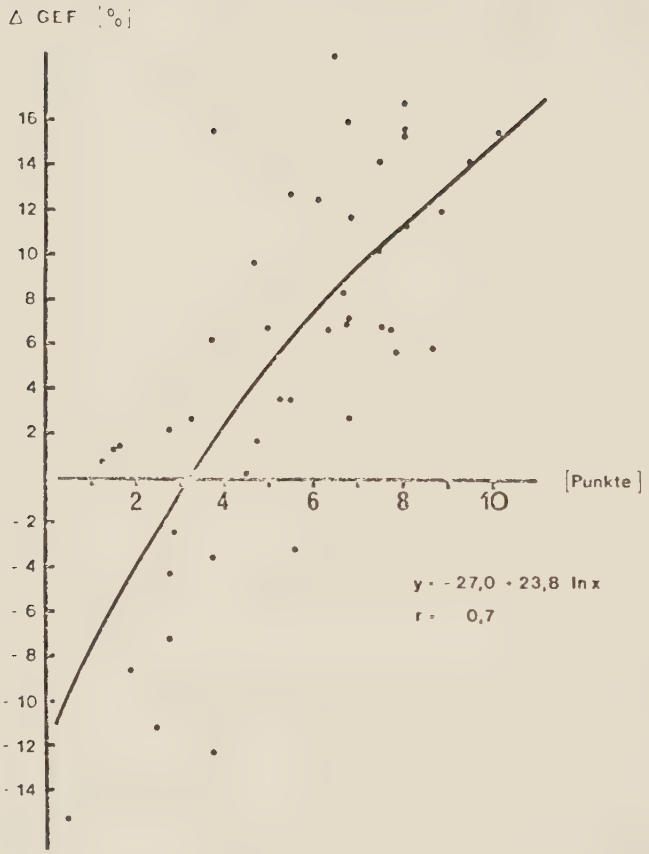

Abb. 27: Korrelation der territorialen Ejektionsfraktion unter Berücksichtigung des Volumenanteils am Gesamtvolumen sowie der funktionellen Beschaffenheit entsprechend Tab. 1 (Seite 41) in Form eines Punktewertes (siehe Berechnungsbeispiel S. 53) zur Differenz der globalen Ejektionsfraktion in Ruhe und unter maximaler Belastung;

Abkürzungen:
GEF = Differenz der globalen Ejektionsfraktion in Ruhe und unter maximaler Belastung

D. Diskussion

I. Diskussion der Methode

1. Vorteil der Isotopenuntersuchung in First-Pass-Technik gegenüber der Katheterangiographie

Nach durchgeführter Bypassoperation ist die linksventrikuläre Funktionsverbesserung durch die Revaskularisationsmaßnahmen als Erfolgskontrolle von entscheidender Bedeutung. Zur Klärung dieser Frage wurde bislang die Angiographie und Ventrikulographie eingesetzt. Als invasive Methoden sind diese Untersuchungsarten mit typischen Risiken (durchschnittl. Komplikationsrate von 3,2 % und einer Mortilitätsrate von 0,1 %) behaftet (1).

Nachdem sich gezeigt hat, daß die mittels dynamischer nuklearmedizinischer Methoden gewonnenen Daten, wie globale Ejektionsfraktion und Ventrikelvolumina, gut mit den angiographisch gewonnenen korrelieren (52, 68), bieten sich diese Methoden auch für die postoperativen Kontrollen an. Neben dem Vorteil der Komplikationsfreiheit haben sie gegenüber der Angiographie ferner den Vorteil einer geringeren Strahlenbelastung sowohl für den Patienten als auch für den Untersucher und sind bei geringerem Aufwand jederzeit wiederholbar. Darüberhinaus können die szintigraphischen Untersuchungen unter Belastung ausgeführt werden, was bei angiographischen Untersuchungen wesentlich schwieriger zu erreichen ist.

2. Durchführung der Untersuchung unter Belastung

Die Kontraktionsstörung zählt zu den ersten Manifestationen der kritischen Minderperfusion, wobei eine unter Ruhebedingungen nicht manifeste Funktionsstörung erst durch

Belastung erkennbar werden kann. Bis zu 85% des Gefäßlumens betragende Stenosen können in Ruhe einen ausreichenden Blutstrom gewährleisten und eine normale Funktion des Myokards in Ruhe aufrecht erhalten (23). Unter Belastung kommt es in diesen Gefäßarealen zu ischämiebedingten Kontraktionsanomalien und Beeinträchtigung der Pumpfunktion. Dies kann sich unter anderem z.B. in einem Absinken der globalen Ejektionsfraktion ausdrücken (72, 83). Physiologischerweise aber steigt die globale Ejektionsfraktion unter Belastung an; sie fällt dagegen ab, wenn größere Gefäßgebiete signifikante Engen aufweisen (35).

Die vor und nach Bypass-Operation unter Ruhebedingungen von anderen Autoren gemessenen Ejektionsfraktionen zeigen in vielen Fällen keine Änderung. Vor allem sind die in Ruhe errechneten Werte prä- und postoperativ dann unverändert, wenn sie präoperativ bereits im Normbereich lagen (35, 19). Dies träfe auf 35 der 50 in dieser Arbeit untersuchten Fälle zu.

Damit bieten sich vor allem Belastungsbedingungen zur Kontrolle des Operationserfolges an. Inwieweit dabei eines der Ziele der Bypass-Chirurgie, die möglichst vollständige Normalisierung der Funktion des linken Ventrikels erreicht wurde, läßt sich durch den Vergleich mit gesunden, auf Belastung mit einem Anstieg der Ejektionsfraktion reagierenden Herzen ermitteln. Dieses Vorgehen erübrigt den direkten prä- und postoperativen Vergleich.

3. Territoriale Ejektionsfraktion als Kriterium

Die globale Ejektionsfraktion bezieht sich auf den gesamten linken Ventrikel als funktionelle Einheit. Damit wird sie dem regionalen Charakter der koronaren Herzerkrankung nicht gerecht, da sie die Funktion in den einzelnen Gefäßterritorien nicht erfaßt, sondern lediglich einen Bilanzwert der Ejektionsfraktionen der drei Hauptgefäßgebiete darstellt. Es sind deshalb von mehreren Autoren (29, 30, 81) regionale quantitative angiographische Analysen der Wandbewegung eingeführt worden (z.B. Methode der Perimeterbewertung, der Querachsenbewertung, der radialen Bewegungsanalyse, der systolischen Wanddickenänderung), die aber alle auf invasive Kontrolluntersuchungen beruhen. Eine Reihe von Untersuchern haben mit Hilfe dieser Methoden prä- und postoperative vergleichende Studien durchgeführt, indem sie in Anlehnung an die Tenant und Wiggers Technik (83) intraoperativ fixierte Metallmarker beobachteten (31, 10). Walton-Brodie Spannungsbrücken (47) oder - in jüngerer Zeit - miniaturisierte Ultraschallsender implantierten.

Neben dem erwähnten Nachteil der Invasivität und der in einigen Fällen (27, 38) nur intraoperativen oder kurzzeitig postoperativen Beobachtungsmöglichkeit sind alle diese Methoden mit einem weiteren Nachteil behaftet: Die gewählten Parameter sind relativ willkürlich dem individuellen Gefäßverlauf der den linken Ventrikel versorgenden Koronararterien zugeordnet.

Wir haben aus diesem Grund eine territoriale Betrachtungsweise gewählt. Die Funktion wurde dabei nichtinvasiv in Ruhe und unter Belastung jeweils in dem Myokardareal untersucht, das von einer der drei Hauptkoronararterien und ihren Ästen versorgt wird. Dieses Vorgehen trägt dem regionalen Charakter der koronaren Herzerkrankung am besten

Rechnung und die Auswirkungen der Bypassoperation auf das jeweils betroffene Myokardgebiet können beurteilt werden.

Benutzt wurde dazu als Parameter der Funktion die Änderung der territorialen Ejektionsfraktion unter Belastung gegenüber dem Ruhewert. Die Benutzung der Änderung der territorialen Ejektionsfraktion unter Belastung gestattet einen Vergleich verschiedener Kollektive mittels absoluter Zahlenwerte (Änderung der territorialen Ejektionsfraktion in % - Punkten). Dabei lassen sich als Gradmesser des Operationserfolges dienende Myokarareale mit normalen Koronargefäßen zum einen und zum anderen infarzierte oder von stenotischen Gefäßen versorgte und nicht operierte Myokardareale definieren, die den gleichen Untersuchungsbedingungen wie alle anderen unterworfen waren.

Da postoperativ nur in Ausnahmefällen eine invasive Kontrolluntersuchung erfolgte und Bypassverschlüsse somit nicht immer durch eine weitere Methode verifiziert werden konnten, gingen sie als Fehler in die Mittelwerte der einzelnen Kollektive ein.

4. Kritik der First-Pass-Technik

Die häufig durchgeführte EkG-getriggerte Herzbinnenraumszintigraphie in Äquilibrierungstechnik kann nicht in der schrägrechten Projektion angewandt werden, da es in dieser Projektion durch die gleichzeitige Füllung aller Herzanteile mit radioaktiv markierten Partikeln (Erythrozyten) zu einer Überlagerung des linken Ventrikels mit anderen Herzkammern kommt - besonders mit dem rechten Ventrikel. Um eine möglichst gute Trennung von rechtem und linkem Ventrikel zu erreichen, wird sie deshalb in schräglinker Projektion (LAO) vorgenommen. Bei der First-Pass-Technik hingegen kann die schrägrechte Projektion verwendet werden, da die radioaktive Substanz als kleiner Bolus die Herzkammern und die Lunge nacheinander passiert und zum Zeitpunkt der Aufzeichnung des linken Ventrikels die anderen Herzanteile und die Lunge weitgehend frei von Radioaktivität sind.

Die dem regionalen Charakter der koronaren Herzkrankheit am besten Rechnung tragende territoriale Betrachtungsweise erfordert die Darstellung des linken Ventrikels in einer Projektion, die möglichst die Koronargebiete voneinander trennt und gleichzeitig den linken Ventrikel in größter Ausdehnung darstellt. Dies ist die schrägrechte Projektion (siehe Abb. 16). Diese Projektion trennt vor allem das Gebiet des Ramus interventricularis anterior und der rechten Koronararterie ohne wesentliche Überlappung. Anlaß zur Kritik gibt lediglich der Umstand, daß die Hälfte bis maximal Zweidrittel des Circumflexagebietes vom linksventrikulären Septum überdeckt wird, welches vom Ramus interventricularis anterior versorgt wird. Dieses Septumareal gehört jedoch dem linksventrikulären Ausflußtrakt an. Da in diesem Gebiet die niedrigsten Ejektionsfraktionen vorliegen, hält sich der Überlappungsfehler in Grenzen und beziffert sich auf 10 bis 20 %

(57) und verliert außerdem durch die alleinige Wertung der Änderung der Ejektionsfraktion an Bedeutung.

Im Gegensatz zur zweidimensionalen Darstellung des Herzens im Koronarogramm und Ventrikulogramm haben die durch die szintigraphische Messung von Aktivitäten mittels senkrecht zum Septum durch das Volumen des linken Ventrikels gelegter Meßzylinder gewonnenen Bilder einen dreidimensionalen Charakter. Wie Untersuchungen von NICKEL (52) gezeigt haben, entsprechen die regionalen Zählraten regionalen Volumina, weshalb aus der Zählratenverteilung das enddiastolische Volumen mit hoher Genauigkeit errechnet werden kann ($r = 0,95$ im Vergleich zur Angiographie). Für die im Koronarogramm ermittelten Gefäßgebiete (siehe Abb. 16) wurden mit dieser Methode Volumenanteile am Gesamtvolumen des linken Ventrikels errechnet. Es wurde angenommen, daß sich die prozentualen Volumenanteile der drei Gefäßgebiete am gesamten enddiastolischen Volumen in Ruhe und unter Belastung nicht wesentlich ändern. Hat man die drei Gefäßgebiete auf diese Weise definiert, kann man für jedes eine territoriale Ejektionsfraktion in Ruhe und unter Belastung bestimmen, die sich auf die entsprechenden enddiastolischen Volumina bezieht.

Benutzt man die First-Pass-Technik, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein, um eine hohe Bild- und Meßgenauigkeit zu erreichen. Durch die rasche Auswaschung der Radioaktivität aus dem linken Ventrikel (bei Herzgesunden nach maximal 11 Herzschlägen) steht nur eine sehr kurze Zeit für die Bildregistrierung zur Verfügung, die mit Zunahme der Herzfrequenz unter der Belastung weiter reduziert wird. Um trotzdem hohe Impulsraten zu gewinnen, bedarf es einer Gammakamera, die mit kurzen Totzeiten arbeitet. Durch den Einsatz einer Multikristallkamera, die Zählraten von bis zu 400.000 Impulsen pro Sekunde erlaubt, können in Kombination

mit einer speziellen Injektionstechnik hohe Impulsraten registriert werden (selten weniger als 180.000 Impulse/s bei Injektion von 20 mCi $99^{m}Tc$). Trotzdem sind die von der Multikristallkamera aufgenommenen Einzelbilder wegen der schnellen Bewegungen des Herzens noch mit großen statistischen Streuungen behaftet. Eine weitere Erhöhung der Zählratendichte und damit Verbesserung der Bildstatistik wird durch Verwendung des "repräsentativen Schlages" ermöglicht, indem die Bilder mehrerer Herzschläge phasengleich addiert werden.

Die exakte, reproduzierbare Herzrandbestimmung erfolgt durch Anwendung des Schwellwertverfahrens nach Kontrastanhebung des linken Ventrikels. Man geht dabei von der Überlegung aus, daß die Definition eines Grenzpunktes dann möglich ist, wenn die Änderung der Impulsratendichte eines Ortes zum benachbarten Ort größer als die korrespondierende statistische Unsicherheit ist. Diese Grenzpunkte des linken Ventrikels werden mittels einer Profilkurve vom Computer ermittelt. Damit werden differierende Herzrandbestimmungen durch wechselnde Untersucher oder unterschiedliche visuelle Beurteilung eines Untersuchers ausgeschlossen. Für eine richtige Herzrandbestimmung muß auch auf die aus anatomischen Gründen unterschiedlich starke Überlagerung des Herzens durch Lungenstrukturen (individuell unterschiedliche Untergrundstrahlung) Rücksicht genommen werden. Dem wird durch Abzug einer variierenden Untergrundstrahlung Rechnung getragen (65 - 69). Werden die vorgenannten Voraussetzungen erfüllt, ergibt sich für die errechneten funktionellen Bilder eine hohe Aussagekraft.

5. Vorteil durch die Benutzung funktioneller Bilder

Nuklearmedizinische Bilder zeigen Zählratenverteilungen oder deren Änderung in einer bestimmten Zeit. Änderungen zwischen zwei Bildern können dadurch nachgewiesen werden, indem man die Bilder voneinander substrahiert. Das einfachste funktionelle Bild - das Wandbewegungsbild (Abb. 13) - entsteht durch Subtraktion der endsystolischen Fläche des linken Ventrikels von der enddiastolischen Fläche. Die sichtbar gemachte Wandbewegung kann mit derjenigen des Ventrikulogramms verglichen werden. Man mißt dazu die Hemiachsenverkürzung in sechs Segmenten. Dabei ergab sich beim Vergleich der Wandbewegungsbilder mit den Ventrikulographien eine Übereinstimmung von 96% für Segmente mit normaler Wandbewegung und 90% für Segmente mit aufgehobener Wandbewegung (Asynergie). Für die hypokinetischen Segmente (verminderte Wandbewegung) wird eine Übereinstimmung von 88% erzielt (67).

Einen Fortschritt stellen diejenigen funktionellen Bilder dar, die nicht nur die Wandbewegung sichtbar machen, sondern Änderungen innerhalb des gesamten linken Ventrikels. Das erste auf diese Weise entwickelte Bild zeigt die Verteilung des Schlagvolumens und entsteht durch Subtraktion der Bildelementpunkte des endsystolischen Bildes von den Bildelementpunkten des enddiastolischen Bildes (64). Es gibt entsprechend den 294 NaJ(TI)-Kristallen 294 Bildelementpunkte (Pixels), die in schrägrechter Projektion jeweils einen durch das Herz oder Umgebung gelegten Zylinder, senkrecht zum Septum, verkörpern. Die durch das Herz verlaufenden Zylinder zeigen die Änderung der Aktivität in einem bestimmten Volumen an und stellen die regionale Auswurffraktion bzw. das Schlagvolumen dar. In vielen Fällen erlauben die Bilder eine detaillierte Analyse der regionalen Funktion. Es zeigte sich eine hohe Übereinstimmung von 96% zwischen Segmenten mit schwerer Dysfunktion und der re-

gionalen Auswurffraktion zur Lokalisation des vorausgegangenen Infarktes (66). Gleichzeitig finden sich darauf von Zeit zu Zeit Unregelmäßigkeiten, die es nicht erlauben, zu entscheiden, ob diese durch statistische Schwankungen oder reelle Störungen der regionalen Funktion bedingt sind. Dies beruht darauf, daß durch Subtraktion zweier Bilder die statistische Unruhe überproportional ansteigt, da das Subtraktionsbild die statistische Fluktuation beider ursprünglichen Bilder enthält. Deshalb hat man in Zonen, in denen sehr geringe Änderungen während der Systole auftreten, hohe Anteile an Unruhe. Derartige Zonen sind schlecht abgegrenzt von den umgebenden Gebieten und ihre Funktion ist schlecht beurteilbar. Gerade diese Zonen interessieren auf Grund der Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von Wandbewegungsstörungen. Stützt man sich nur auf das endsystolische und enddiastolische Bild, geht ferner die Information verloren, die während der gesamten systolischen Änderung registriert wird.

Zur Erzielung einer höheren Genauigkeit wurde eine Gruppe funktioneller Bilder eingeführt (Ejektionsfraktionsbild, Ejection Rate Image, Bild der mittleren Transitzeit), die alle regionalen Änderungen einer Herzphase oder eines Teils aufzeigen und eine geringe statistische Fluktuation besitzen (53). Das einzige in dieser Arbeit aus der genannten Gruppe benutzte Bild - das Ejektionsfraktionsbild - wird wie die anderen Bilder der Gruppe durch zeitliche Glättung erarbeitet und bezieht Informationen aus allen Phasen der Systole und stellt damit einen Mittelwert der systolischen Änderung dar. Da die funktionellen Bilder nichts anderes darstellen als eine mit Grauwerten oder Farben codierte Zahlenverteilung (Matrix), in unserem Fall regionale Ejektionswerte, wird die Funktion in jedem gewünschten Gebiet durch die Errechnung der regionalen Ejektionsfraktion oder, bezogen auf die Versorgung des linken Ventrikels aus drei Hauptkoronararterien, durch Errechnung der territorialen Ejektionsfraktion meßbar.

Vergleiche der funktionellen Bilder mit angiographischen Untersuchungen bestätigten die hohe Empfindlichkeit dieser Bilder. In einer Untersuchung von 200 Fällen in Ruhe und unter Belastung zeigte sich, gemessen an der Angiographie, eine Sensitivität von 95 % im Erkennen der ventrikulären Dysfunktion. Die richtige Diagnose einer Koronaropathie wurde in diesem nicht selektionierten Krankengut in 90 % gestellt (2). Eine andere Gegenüberstellung von Koronarogramm und funktionellen Bildern bei 43 Patienten erbrachte eine Empfindlichkeit im Erkennen einer Stenose des Ramus interventricularis anterior (Vorderwand) von 93 %, bei Einschluß der Diagonaläste von 97 %. Ähnliche Werte ergaben sich für die Hinterwand (71).

Die funktionellen Bilder in Ruhe und unter Belastung lassen somit mit hoher Empfindlichkeit eine pathologische Funktion des linken Ventrikels erkennen, mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Koronarerkrankung und das davon betroffene Gebiet, weshalb sich diese Technik für die Bypasskontrolle besonders eignet.

II. Diskussion der Ergebnisse

1. Klinische Ergebnisse

Die Verlängerung der Überlebenszeit von Patienten mit operativ versorgter Dreigefäßerkrankung und linker Hauptstammstenose im Vergleich zu nichtoperierten Patienten ist in der Literatur nachgewiesen (17, 44, 49, 72, 82). Besserung der Symptomatik nach der Operation wird von ca. 90 % der operierten Patienten angegeben und in 60 - 80 % (26, 63, 41, 74) sogar Beschwerdefreiheit. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Patienten betrachten sich selbst in 98 % bezüglich ihrer anginösen Beschwerden als gebessert; 62 % sind in Ruhe und unter Belastung beschwerdefrei. Diese

Besserung der Symptomatik drückt sich auch durch die Reduktion des Verbrauchs an Nitropräparaten aus; nur noch 52 % der Patienten nehmen Nitropräparate ein (im Gegensatz zu 100 % vor der Operation); andere Autoren nennen ähnliche Zahlen (43).

Auch die Zunahme der Leistungsfähigkeit (86 %) und die Zahl der postoperativ berufstätigen Patienten (46 bzw. 56 %) bewegen sich im Rahmen der für Europa bekannten Zahlen (74), erreicht jedoch nicht den für Amerika angegebenen Wiederbeschäftigungsgrad von 75 - 80 %.

2. Territoriale Ejektionsfraktion unter Belastung

In der nachstehenden Graphik (siehe Abb. 28) ist die Änderung der territorialen Ejektionsfraktion unter Belastung aller untersuchten Gruppen dargestellt. Die Funktion des Myokards nach Bypassoperation wird dabei anhand der territorialen Ejektionsfraktion unter Belastung verglichen mit dem Verhalten von Gefäßterritorien ohne koronare Erkrankung (Anstieg unter Belastung 11,6 % - Punkte) und Myokardregionen mit hochgradig stenosierten Gefäßen oder abgelaufenen Infarkten (Absinken um 9 % - Punkte).

Im einzelnen findet sich ein durchschnittlicher Anstieg der Ejektionsfraktion der komplett revaskularisierten Territorien um 11 % - Punkte, die damit auf die Belastung wie die Ejektionsfraktion normal perfundierter Gefäßgebiete reagiert. (Der Anstieg der Ejektionsfraktionen beider Gruppen zeigt keinen signifikanten Unterschied.)

Signifikant geringer (um 4,1 % - Punkte) steigt hingegen die Ejektionsfraktion der komplett revaskularisierten Terri-

torien mit vorausgegangenem Infarkt an. Ein Absinken der territorialen Ejektionsfraktion unter Belastung zeigen die inkomplett revaskularisierten Territorien (4,9 bzw. 8,1 %-Punkte), wobei sich die inkomplett revaskularisierten Gebiete mit vorausgegangenem Infarkt kaum von den Gebieten mich hochgradig verengten Koronararterien oder abgelaufenem Infarkt ohne Revaskularisation unterscheiden.

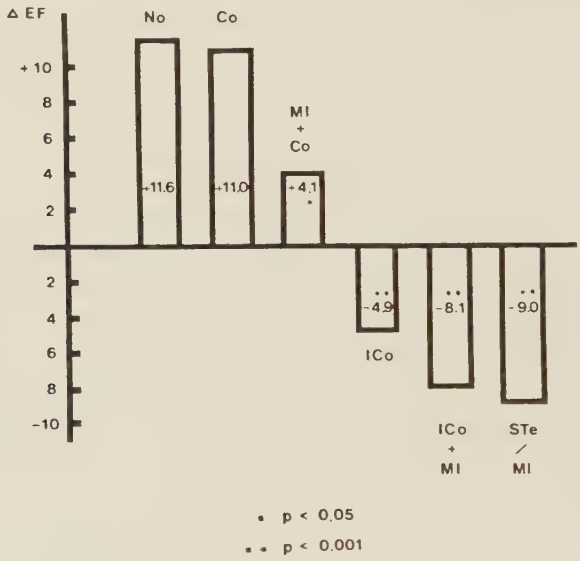

Abb. 28: Änderung der territorialen Ejektionsfraktion unter Belastung (vgl. nachfolgende Ausführungen im Text)

No = normale Gefäße

Co = komplett revaskularisiert

ICo = inkomplett revaskularisiert

STe/MI = hämodynamisch wirksame Stenose oder abgelaufener Infarkt ohne Revaskularisation

Damit bietet die komplette Revaskularisation die besten funktionellen Ergebnisse und führt zu einem Anstieg der territorialen Ejektionsfraktion unter Belastung.

Bei einzelnen Fällen kommt es trotz kompletter Revaskularisation nicht zu einem Anstieg der territorialen Ejektionsfraktion oder sogar zum Absinken derselben (20/80). Zur Erklärung kommen neben einem durchgemachten intraoperativen Infarkt (siehe oben) mehrere Ursachen in Frage:

a) Bypassverschluß
b) niedrigere Blutströmungsgeschwindigkeit im Venentransplantat
c) Prolaps der Mitralklappe
d) hohe Ejektionsfraktionswerte in Ruhe.

ad a):
DEEG (19) fand in seinem mit der gleichen Methode untersuchten und angiographisch kontrollierten Krankengut 8 von 95 Venentransplantate verschlossen. Dabei fiel die Ejektionsfraktionen in den entsprechenden Gebieten mit Ausnahme von zwei Fällen unter Belastung ab; diese wiesen etwa 75%-ige Stenosen des bypassversorgten Ramus interventricularis anterior auf, die jedoch distal von kräftigen Diagonalästen waren.

ad b):
CHESEBRO und Mitarbeiter beurteilten den operativen Erfolg aortokoronarer Bypass-Operationen mit Hilfe der maximalen Dickenzunahme des linksventrikulären Myokard. Waren postoperativ die Venenbrücken durchgängig, konnte eine Besserung des Dickenquotienten beobachtet werden; bei 10 offenen Bypasses konnte der Effekt dennoch nicht gesehen werden. Die Autoren begründeten dies mit niedrigen Bypass-Flüssen: Videodensitometrisch am postoperativen Koronarangiogramm bestimmt, betrug er weniger als 60 ml/min (16).

ad c):
Der Prolaps der Mitralklappe kann je nach der Ausprägung das Verhalten der territorialen Ejektionsfraktion in Ruhe und unter Belastung mehr oder weniger beeinflussen. FLEMING und Mitarbeiter (21) fanden in einer Untersuchung von 42 Patienten mit Mitralklappenprolaps ohne koronare Herzerkrankung (bei insgesamt 154 mit Ultraschall, Angiographie und Radionuklidstudie untersuchten Patienten mit Mitralklappenprolaps) 17mal ein Absinken der Ejektionsfraktion unter Belastung. Meist betraf die abnorme Wandbewegung die Hinterwand und das von der rechten Koronararterie versorgte Myokardareal. Der Mitralklappenprolaps kann aber, wenn auch selten, Wandbewegungsstörungen und eine Herabsetzung der Ejektionsfraktion im Bereich der oberen Vorderwand hervorrufen.

Dieses Verhalten konnte in unserer Kontrollgruppe 1 (von normalen Gefäßen versorgte Territorien) ebenfalls beobachtet werden, denn die territoriale Ejektionsfraktion stieg bei nachweisbarem Mitralklappenprolaps im Gebiet der rechten Koronararterie in 4 von 8 Fällen nicht an. Damit kann der Prolaps der Mitralklappe das funktionelle Ergebnis der Operation im Bereich der oberen Vorderwand, vor allem aber im Gebiet der rechten Koronararterie beeinflussen und das Absinken der territorialen Ejektionsfraktion in einem komplett revaskularisierten Territorium der rechten Koronararterie erklären.

ad d):
Bei hochnormalen Ruheejektionsfraktionswerten (zu beobachten mitunter bei arterieller Hypertonie oder erhöhten Sympathicotonus) kann keine oder nur eine geringe Steigerung unter Belastung erwartet werden. Verdeutlicht wird dies durch die Regressionsgeraden der Gruppe der von normalen Gefäßen versorgten Territorien (Kontrollgruppe 1) und der Gruppe mit komplett revaskularisierten Myokardarealen ohne Infarkt. Die Regressionsgeraden schneiden die 45°-Identitätslinie zwischen 70 und 80 % Ejektionsfraktion (Abb. 21), d.h. eine Steigerung ist nicht möglich.

3. Beziehung zwischen territorialer und globaler Ejektionsfraktion in Ruhe und unter Belastung

Ein Anstieg der globalen Ejektionsfraktion um 10%-Punkte (60, 35) bzw. 10 bis 15%-Punkte (9) wird als physiologisch betrachtet. Die globale Ejektionsfraktion von Patienten mit koronarer Herzerkrankung zeigt im Durchschnitt, je nach Ausmaß der Erkrankung ein Absinken unter Belastung, vor allem bei zwei oder mehr stenosierten großen Gefäßen.
Von dieser Regel gibt es jedoch zahlreiche Ausnahmen. Als Ursache ist anzuführen, daß es sich bei der globalen Ejektionsfraktion um eine Bilanz der Ejektionsfraktionen der drei Gefäßgebiete - des Ramus interventricularis anterior, des Ramus circumflexus und der rechten Koronararterie - handelt. Weisen alle drei Territorien die gleiche Beschaffenheit auf, d.h. sind sie z.B. alle ohne Infarkt und komplett revaskularisiert oder von normalen Gefäßen versorgt, so verhält sich die globale Ejektionsfraktion genauso wie die Ejektionsfraktionen der einzelnen Gebiete. Aufgrund des regionalen Charakters der koronaren Herzerkrankung ist die Beschaffenheit der einzelnen Gefäßgebiete jedoch unterschiedlich. So können nicht revaskularisierte Myokardareale zusammen mit komplett revaskularisierten oder infarzierten Gebieten vorkommen. Die globale Ejektionsfraktion spiegelt dann den Nettoeffekt aller territorialen Ejektionsfraktionen der verschiedenen Gefäßgebiete mit möglicherweise unterschiedlichen Kontraktionsverhalten wider. Eine Vielzahl von Kombinationen sind denkbar (es lassen sich in unserem Krankengut 36 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten nachweisen). Erst das Wissen um den funktionellen Status jeder einzelnen Region hilft zu verstehen, warum die globale Ejektionsfraktion ansteigt, unverändert bleibt oder sich sogar verschlechtert. Ein unveränderter Globalwert unter Belastung, ja in seltenen Fällen sogar eine Verschlechterung muß nicht unbedingt gleichbedeutend sein mit einem operativen Mißerfolg. Dieser Globalwert kann durchaus

aus der Kombination einer vorbestehenden großen Infarktnarbe und einem kleineren erfolgreich revaskularisierten Gebiet resultieren, wodurch die Bilanz schließlich negativ oder unverändert ausfallen kann.

Die globale Ejektionsfraktion ist jedoch keine simple Addition von Werten der einzelnen Territorien wie Abb. 27 und Tab. 2 zeigen. Dem größten Gefäßgebiet - dem Territorium des Ramus interventricularis anterior mit im Mittel 58 % Anteil am linksventrikulären Volumen - kommt in der Regel die größte Bedeutung zu. Bei einer kompletten Revaskularisation dieses Gebietes ohne vorausgegangenen Infarkt verbessert sich die globale Ejektionsfraktion in 89 % (24/27), während bei inkompletten Eingriffen die Besserungschancen auf unter 20 % (2/10: 0/4) absinken. Diese Aussage ist für operationstaktische Erwägungen von Bedeutung, gilt es doch vor allem, diese Region möglichst optimal wieder herzustellen. Ist jedoch das Territorium des Ramus interventricularis anterior durch Infarktnarben irreversibel geschädigt oder nur inkomplett zu revaskularisieren, so kann durch Bypasses zu kleineren Ästen des Ramus circumflexus und der rechten Koronararterie oft keine Besserung der globalen Ejektionsfraktion unter Belastung erwartet werden. Ziel der Operation wäre dann die Schmerzfreiheit des Patienten.

E. Schlußfolgerung

Es wurde gezeigt, daß sich die First-Pass-Radionuklidangiographie in schrägrechter Projektion (RAO) als empfindliche Methode zur postoperativen Kontrolle bypassversorgter Patienten eignet. Sie ermöglicht eine genaue Analyse der Funktion der mit Bypasses versorgten Myokardareale. So konnte nachgewiesen werden, daß eine komplette Revaskularisation einen Anstieg der territorialen Ejektionsfraktion zur Folge hat und daß das Gebiet des Ramus interventricularis anterior für das Verhalten der globalen Ejektionsfraktion entscheidend ist. Ihm sollte daher das chirurgische Bemühen einer vollständigen Wiederherstellung gelten.

Die Revaskularisation kleinerer Gefäße bei Schädigung großer Gebiete durch Infarkte, sowie Revaskularisation der rechten Koronararterie bei Mitralklappenprolaps dienen dem Ziel der Schmerzfreiheit.

F. Zusammenfassung

50 Patienten (mittleres Alter 57 Jahre) unterzogen sich einer aorto-koronarer Bypass-Operation, wobei 161 Anastomosen, durchschnittlich 3,2 ± 0,9 pro Patient angefertigt wurden. Frühestens 3 Monate postoperativ erfolgt die nicht invasive Herzbinnenraumszintigraphie mit Hilfe der First-Pass-Technik (Injektion von 20 mCi 99^m-Technetium Pertechnetat) in Ruhe und nach Belastung. Zu diesem Zeitpunkt sind 62 % der Patienten beschwerdefrei, 34 % deutlich gebessert, 56 % der operierten Patienten arbeiten wieder oder beabsichtigen zu arbeiten.

Neben der Errechnung der globalen Ejektionsfraktion und Erarbeitung funktioneller Bilder zur Beurteilung der regionalen Funktion gestattet die First-Pass-Technik aufgrund der möglichen schrägrechten Projektion des Herzens eine Unterteilung des linken Ventrikels in die drei Hauptgefäßterritorien entsprechend dem präoperativen Angiogramm. Damit ist die Bestimmung der territorialen Ejektionsfraktion und der territorialen Funktion möglich.

Technische Grundvoraussetzungen zur exakten Bestimmung der regionalen und territorialen Funktion sind: hohe Impulsratendichte durch Injektion eines kompakten Bolus, Verwendung einer Multikristallkamera und Bildung eines repräsentativen Schlages, genaue Herzrandbestimmung und Subtraktion einer adäquaten variierenden Untergrundstrahlung.

Die globale Ejektionsfraktion stellt eine Bilanz der drei territorialen Ejektionsfraktionen dar, wobei sie stark vom Verhalten des größten Territoriums, des Ramus interventricularis anterior mit durchschnittlich 57,8 % Anteil am gesamten Ventrikel, geprägt wird. So kann die globale Ejektionsfraktion einen falschen Eindruck des territorialen Verhaltens vor allem der kleineren Gefäßterritorien hervorrufen.

Komplett revaskularisierte Territorien zeigen einen signifikanten Anstieg der territorialen Ejektionsfraktion unter

Belastung (im Durchschnitt + 10 Punkte), der sich vom Anstieg der Normalen (durchschnittlich + 11 Punkte) nicht signifikant unterscheidet. Sie steigen signifikant stärker als alle anderen an. Komplett revaskularisierte Territorien mit Myokardinfarkt zeigen einen signifikant geringeren Anstieg ($+4,1 \pm 5,4$ Punkte) der territorialen Ejektionsfraktion gegenüber den Normalen (p kleiner 0,025) und den komplett revaskularisierten ohne Infarkt (p kleiner 0,005). Sie unterscheiden sich jedoch signifikant von den inkomplett revaskularisierten Territorien; diese zeigen ein Absinken der territorialen Ejektionsfraktion unter Belastung und unterscheiden sich nicht signifikant von den nicht revaskularisierten Territorien mit Infarkt und/oder signifikanter Stenose.

G. Literaturverzeichnis

1 Abrams H.L., Adams D.F.:
The complications of coronary arteriography
Circulation 51/52 (1975) II - 27

2 Andrews E.J., Fleming J.W., Schad N., Nickel O., Mello M.:
New computer programs for radionuclide evalution of ventricular wall motion in ischemic heart disease
28th Annual Meeting "RSNA" (1981)

3 Anger H.: Scintillation camera
Rev.Sci.Instr. 29 (1958) 27

4 Bayrisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung:
Sterbefälle nach Todesursachen in Bayern, 4. Vj. 1982
Bayr. Ärzteblatt 5 (1983) 375

5 Beck C.S.:
The development of a new bloodsupply to the heart by operation
Ann.Surg. 102 (1935) 801

6 Beck C.S., Stanlon E., Batinchok W., Leiter E.:
Revascularisation of the heart by graft or systemic artery into coronary sinus
J.Amer.med.Ass. 137 (1948) 436

7 Bender M., Blau M.:
The autofluoroscope
Nucleonics 21 (1963) 52

8 Bretschneider H.J.:
Überlebenszeit und Wiederbelebungszeit des Herzens bei Normo- und Hypothermie
Verh.Dtsch.Ges. Kreislaufforschung 30 (1964) 11

9 Brill G., Oberhausen E., Klein C.P.:
Messung von Herzminutenvolumen, Ejektionsfraktion und zeitlichen Volumendifferential in Ruhe und unter Ergometerbelastung
Der Nuklearmediziner Supplementum (1979) 68 - 76

10 Brower R.W., Serrys P.W., Bos E., Nauta J.:
Regional myocardial shortening in relation to graft-reactive hyperemia and flow after coronary-bypass surgery
J.Thor.Card.Vasc.Surg. 77 (1979) 92

11 Büll U.:
Ist die Myokardszintigraphie mit 201 Thallium eine Perfusionsszintigraphie?
Der Nuklearmediziner Supplementum (1979) 31

12 Bundesverband der Ortskrankenkassen Bonn:
Krankheitsarten - Krankheitsursache und Sterblichkeitsstatistik der Ortskrankenkassen 1972

13 Caldwell J.H., Hamilton G.W., Deronen T.A., Williams D.L., Ritchie J.L., Sorensen S.G.:
Serial measurement of ventricular ejection fraction by radionuclide angiography.
A methodologic and statistical approad
Der Nuklearmediziner
Supplementum (1979) 36 - 47

14 Castleman K.:
Digital image processius
Prentice-Hall, Englewood Cliffs
New Jersey 1979

15 Cavalli-Sforza L.:
Grundzüge biologisch-medizinischer Statistik
Gustav Fischer Verlag Stuttgart 1974

16 Chesebro J.H., Ritman E.L., Fryre R.L., Smith H.C., Conolly D.C., Rutherford B.D., Davis G.D. et al:
Videometric analysis of regional left ventricular function before and after aortocoronary bypass surgery
A clinical study
Ann.Thorc.Surg. 26 (1978) 548

17 Cohen M.V., Gorlin R.:
Main left coronary artery disease
Clinical experience from 1964 - 1974
Circulation 52 (1975) 275

18 Daniel W., Döhring W., Elgeli H., Lichtlen P.R., Stender H.St., Borst H.G.:
Darstellung von aorto-koronaren Venengrafts mit Hilfe der nicht dynamischen Computertomographie
Schweiz.med.Wschr. 110, 1980, 1654

19 Deeg P., Schad N., Haubitz J., Emde v. dE., Schneider K.W.:
Nichtinvasive und invasive Erfolgskontrolle nach ACVB-Operation
46th Session of German Society for Cardiovascular Research, Bad Nauheim April 11 - 13, 1980

20 Farrat H.E., Dennis E.W., De Bakey M.E.:
Aorto-coronary bypass with saphenous vein graft
Jama 223 (1973) 792

21 Fleming J.W., Andrews J., Drenson N., Ballagas A.J., Horusby A.T., Mc.Craw D.B., Williams J.C., Mello M.:
Left ventricular global and regional dysfunction in mitral valve prolaps syndrome
Review of 175 cases studied with rest and exercise first pass radionuclide angiocardiography (pers.Mitt.

22 Garrat H.E., Dennis E.W., De Bakey M.E.:
Aorto coronary bypass with saphenous vein graft
Jama 223 (1973) 792

23 Gould K.L., Lipscomb K., Hamilton G.W.:
Physiologic basis for assessing critical coronary stenosis: instantaneous flow reponse and regional distribution during coronary flow reserve
Am.J.Cardiol. 33 (1974) 87

24 Grenier R.:
System Seventy: Optimization of a multicristal camara for spatial resolution and count rate
Baird Atomic, Bedford (1974)

25 Guthauer D.F., Brody W.R., Ricci M., Oyer E.P., Wexler L.:
The use of computed tomography in the diagnosis of coronary artery bypass graft patency
Cardiovasc.Intervent.Radiol. 3 (1980) 3

26 Hacker R.W., Torka M., v.d. Emde J.:
Revaskularisation des Myokards durch aortokoronaren Bypass
Deutsches Ärzteblatt 47 (1983) 23

27 Hagl S., Meisner H., Heimisch W., Sebening F.:
Acute effects of aortocoronary bypass surgery on left ventricular function and regional myocardial mechanics. A clinical study.
Ann.Thor.Surg. 26 (1978) 548

28 Hairston P., Newman W.H., Danielle H.B.:
Myocardial contractile force as influencea by direct coronary surgery
Ann.Thor.Surg. 15 (1973) 364

29 Harris G.W., Murray J.A., Kennedy J.W.:
Quantitative angiocardiography in ischemic heart disease. The spectrum of abnormal left ventricular function and the role of abnormaly contractions segments
Circulation 45 (1972) 1065

30 Harris L.D., Clayton P.D., Marshall H.W., Warner H.R.:
A technique for the detection of asynergistic motion in the left ventricle
Europ.J.Cardiol. 5 (1977) 167

31 Hetzer R., Heim K., Borst H.G., Amende J., Sigwart U.:
Röntgenkinematographische Studien der lokalen Ventrikeldynamik vor und nach aortokoronarem Bypass
Thoraxchirurgie 24 (1976) 296

32 Heuser L., Lachner K., Hauser H.:
Validität der Computertomographie bei Darstellung offener und verschlossener aortokoronarer Venenbrücken
Fortschr.Röntgenschr. 137 (1982) 619

33 Hör G.:
201 Tl-Myokardszintigraphie (II. Klinik und Sensivität)
Der Nuclearmediziner Supplementum (1979) 12

34 Jones R.H.:
Radionuclide hemodynamic studies in adults and children
Recent advances in nuclear medicine technical and clinical aspects
Society of Nuclear Medicine, Atlanta (1975)

35 Jones R.H.:
Rest and Exercise radionuclide angiography
Der Nuclearmediziner Supplementum (1979) 81

36 Judkins M.P.:
Selective coronary arteriography. A percutaneous transfemoral technique
Radiology 89 (1967) 815

37 Kawana M., Kuzek H., Porter J., Lathrop K., Charles D., Harper P.V.:
Use of 199 Tl as a potassium analog in scanning.
J.Nucl.Med. 11 (1970) 333

38 Kleinmann L.H., Hill R.C., Chitwood W.R., Hammon J.W., Jones K.W., Wechsler A.S.:
Regional myocardial dimensions following coronary artery bypass grafting in patients
J.Thorc.Cardiovasc.Surg. 77 (1979) 13

39 Klinner W., Reichart B.:
Chirurgie des Herzens (1977)
Chirurgie der Gegenwart, (1977) III - 46

40 Lackner K., Thurn P., Orcellano L., Sluppan U., Simon H., Leirchhoff P.G.:
Der aortokoronare Bypass im Computertomogramm
Fortschr.Röntgenschr. 133 (1980) 459

41 Laurie G.M., Morris G.C., Howell J.F., et al:
Results of coronary bypass more than 5 years after operation in 434 patients
A.J.Cardiol 40 (1977) 665

42 Lebowitz E., Greene M.W., Fairchild R., Bradley-Moore B.R., Atkins H.L., Richards P., Belgrave E.:
Thallium 201 for medical use
J.Nucl.Med. 16 (1975) 151

43 Lichtlen P., Liese W., Leitz K., Borst H.G.:
Postoperative Klinik nach aortokoronaren Venenbypass in Relation zum Ausmaß der Revaskularisation
Zeitschrift für Kardiologie 67 (1978) 83

44 Lichtlen P.:
Langzeitresultate der Bypasschirurgie
Med.Welt 29 (1978) 12

45 Lichtlen P.:
Koronarangiographie
Peri med Verlag (1979) 444

46 Lösse B., Rattlenbeul D., Krönert K., Lierde C.V., Feinendegen L.E., Loogen F.:
201 Tl Myocardial imaging for Evolution of aortocoronary bypass graft patiency
18. Jahrestagung d. Ges. f. Nuk.Med. Nürnberg
9. - 12.9.1980

47 Moran S.V., Tarazi R.C., Urzua J.U., Favorolo R.S., Effler D.B.:
Effects of aorto-coronary bypass on myocardial contractolity
J.Thorc.Card.Vasc.Surg. 65 (1973) 335

48 Mullins L.R., Moore R.D.:
The movement of thallium-ions in muscle
J.Fen.Phys. 43 (1960)

49 Nagel J., Fischer E., Angehorn W., Meier W., Rothlin M.:
Lebenserwartung und Infarkt nach aortokoronarer Bypassoperation
Schweiz.Med.Wochenschr. 106 (1976) 1546

50 Netter F.H.:
Farbatlanten der Medizin
Bd. I. Herz. Thieme (1976)

51 Nickel O., Schad N.:
Image analysis of the heart action recorded with a high speed multicristal gamma camara
Med.Progr.Techn. 5 (1978) 1

52 Nickel O., Schad N., Andrews Jr. E.J., Fleming J.W., Mello M.:
Scintigraphic measurements of left ventricular volums from the count density distribution
J. of Nucl.Med. 23 (1982) 404 - 440

53 Noellp U., Schad N. et al:
Trendszintigraphie
Nucl.Med. 16 (1977) 232

54 Pavlidis T.:
Structural pattern recognition
Springer Series in Electrophysics. Vol. I
Springer Verlag 1977

55 Pierson R., v.Dyke D.:
Analysis of left ventricular function
in: Quantitative Nuclear Cardiography
Pierson R., Kriss J., Jones R., Mc.Intyre W.
Wiley, New York (1975)

56 Pretschner O.P., Freihorst J., Kiessling D., Gleitz C.D., Hundeshagen H., Lichtlen P.:
Ergebnisse der quantitativen 201 Tl-Myokardszintigraphie vor und nach aortokoronarer Venenbypassoperation
18. Internationale Jahrestagung der Gesellschaft für Nuk.Med., Nürnberg Sept. 9. - 12. (1980)

57 Reichart B., Schad N., Nickel O., Kemkes B.M., Kreuzer E., Harrington B.:
Regional left ventricular function in the three main coronary artery territories at rest and during exercise. Non-invasive assessment after aortocoronary bypass surgery
Klinische Wochenschr. 60 (1982) 181 - 191

58 Reichart B., Weinhold C., Metzenbauer L., Wenzer E.:
Atlas der Herzchirurgie
PVG 22 (1982) 65

59 Reindl P., Schad N.:
Untersuchungen zur Injektionstechnik für die Radiokardiographie
12. Internat.Jahrestagung der Ges.f.Nukl.Med. 1974

60 Rerych S.K., Scholz P.M., Newman G.E., Sabiston D.C., Jones R.H.:
Cardiac function at rest and during exercise in normals and patients with coronary artery disease Evaluation by Radionuclide Angiography
Ann.Surg. 187 (1978) 449

61 Rickwas A., Seabra-James R., Thurston P.:
The assessment of regional abnormalities of the left ventricle by angiography
Europ.J.Cardiol. 5 (1977) 167

62 Rodewald G., Polonius M.J.:
Cardiac Surgery in the FRG during 1982. A report by the German Society for Thorac. and Cardiovascular Surg. Thorac. cardiovasc. Surgeon 31 (1983) 188 - 190

63 Rothlin M., Senning A.:
Indikationen, Risiko und Spätergebnisse der Koronarchirurgie
Internist 18 (1977) 322

64 Schad N.:
Nichtinvasive Darstellung der Wandbewegung und Schlagvolumenverteilung des linken Ventrikels nach Myokardinfarkt
Fortschr.Röntgenschr. 124 (1976) 201

65 Schad N.:
Nontraumatic assessment of left ventricular wall motion and regional stroke volums after myocardial infarction
J.Nucl.Med. 18 (1977) 333

66 Schad N., Nickel O.:
Radionuklid angiography in coronary heart desease. Where do we stand?
Cardiovasc.Radiol. 1 (1978) 27

67 Schad N., Nickel O.:
Assessment of ventricular function with first pass angiocardiography
Cardiovasc.Radiology 2 (1979) 149 - 160

68 Schad N., Nickel O.:
Nichtinvasive Beurteilung der regionalen Funktion des linken Ventrikels
Radiologie 20 (1980) 56

69 Schad N., Nickel O., Marron B.J.:
Die Radionuklidangiographie des linken Ventrikels mit der First-Pass-Technik
Röntgenpraxis 33 (1980) 135 - 160

70 Schad N., Schepke P., Rohde U., Schepke H., Schmid V., Breit A.:
Timing exposure in angiographic computed tomography
Cardiovasc.Interv.Radiol. 4 (1981) 59

71 Schad N.:
L'imaging non invasiva della funzione ventriculare sinistra
Giornale Italiano di Cardiologica Vol. XII (1982)

72 Sharma B., Goodwin J.F., Raphael M.J., Steiner R.E., Rainbow, Taylor S.H.:
Left ventricular angiography on exercise. A new method for assessing left ventricular function in ischemic heart disease
Brit.Heart J. 38 (1976) 59

73 Schicha H., Blanke H., Rentrop R., Karsch K.R., Kreuzer H., Emrich O.:
Untersuchungen der Funktionsfähigkeit aortokoronarer Bypasse mit der Thalliumszintigraphie
18. Jahrestagung d.Ges.f.Nuk.Med. Nürnberg 9. - 12.9.1980

74 Schieffer H.:
Rehabilitation und Nachsorge bei Patienten mit koronarchirurgischen Eingriffen
Bayr.Ärzteblatt 5 (1983) 324

75 Schrey A.:
Die koronare Herzerkrankung. Ein Leitfaden für die Praxis.
Urban und Schwarzenberg (1978)

76 Selden R., Neill W.A., Ritzmann W., Okies J.E., Anderson R.:
Medical versus surgigal therapy for acute coronary insufficiency
New Engl.J.Med. 293 (1975) 1329

77 Sialer G.G., Lütolf U.M., Hirzel H.O., Kragenbühl H.P., Horst W.:
250 Patienten mit Thalliumszintigraphie: Vergleichende Ergebnisse bei CAD (143), vor und nach aortokoronarem Bypass (65) sowie perkutaner transluminaler Koronardilitation (36)
18.Jahrestagung d.Ges.f.Nuk.Med. Nürnberg 9. - 12.9.1980

78 Sones F.M., Shirey E.K., Prondfit W.L., Wescott R.N.:
Cine coronary arteriography
Circulation 20 (1959) 773

79 Sones F.M., Shirey E.K.:
Cine coronary arteriography
Mod.Concepts Cardiovasc.Dis. 31 (1962) 735

80 Statistisches Bundesamt Wiesbaden:
Fachserie A: Bevölkerung und Kultur Reihe 7
Verlag W.Kohlhammer, Stuttgart (1972)

81 Stewart D.K., Hamilton G.W., Murray J.A., Kennedy J.W.:
Left ventricular function and coronary artery anatomy before and after myocardial infarction
A study of six cases.
Circulation 49 (1974) 47

82 Stiles O.R., Lindesmith G.G., Tucher B.L., Hughes R.K., Meyer B.W.:
Long-term follow up of patients with coronary bypass grafts
Circulation 54 (1976) III - 32

83 Tenant R., Wiggers C.J.:
Effect of coronary occlusion on myocardial contraction.
Amer.J.Physiol. 112 (1935) 351

84 Ullyot D.J., Turley K., Mc.Kay C.R., Brundage B.H., Lipton M.J., Ebert P.A.:
Assessment of saphenons graft patency by contrast-enhanced computed tomography
J.Thorc.Cardiovasc.Surg. 83 (1982) 512

85 Vineberg A.M.:
Development of an anastomosis between the coronary vessels and a transplanted internal mammary artery
Canad.med.Ass.J. 55 (1946) 117

86 Wenz W., Beduhn D.:
Extremitätenangiographie
Springer Verlag (1976) 22

Herrn Prof.Dr.rer. nat. W.Kinzer danke ich für die Überlassung des Themas und Herrn Prof.Dr.med. R.Reinhart für die Hilfe bei der Verfassung der Arbeit.

Zu danken habe ich Herrn Prof.Dr.med. A.Breit, an dessen Abteilung im Krankenhaus Passau die postoperativen Untersuchungen erfolgten und insbesondere Herrn Prof.Dr.med. L.Graef, der mich mit der Untersuchungstechnik der Radionuklidangiographie in First-Pass-Technik vertraut machte und unterstützte.

Für die Überlassung von Angiographiefilmen danke ich Herrn Prof.Dr.med. L.Michel (Chirurgische Klinik Augustinum München) und Herrn Prof.Dr.med. H.Jahrmärker (Innenstadtklinik der Universität München).

L e b e n s l a u f

Geboren am 22.5.1948 in Maineck (Landkreis Lichtenfels), besuchte ich zunächst 5 Jahre dort die einklassige Volksschule. Anschließend wechselte ich auf den mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig des Markgraf Georg Friedrich Gymnasiums in Kulmbach. Nach dem Abitur 1969 folgten 18 Monate Grundwehrdienst bei der Bundeswehr. Im Sommersemester 1971 begann ich nach einem Semester Physik an der Technischen Universität München in Würzburg das Medizinstudium, das ich im Dezember 1976 mit dem Staatsexamen abschloß.

Vom August 1977 bis März 1979 war ich als Medizinalassistent bzw. als Assistenzarzt an der Inneren und Chirurgischen Abteilung des Krankenhauses Passau beschäftigt. Seit dem 1. April 1979 gehöre ich der Radiologischen Abteilung des Städtischen Krankenhauses Passau als Assistenzarzt an.